



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**MĚŘENÍ TVRDOSTI A VRYPOVÉ ODOLNOSTI POMOCÍ
UNIVERZÁLNÍHO TRIBOMETRU**

HARDNESS AND SCRATCH RESISTANCE MEASUREMENT USING UNIVERSAL TRIBOMETER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Urbášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Omasta, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Jan Urbášek
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Milan Omasta, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření tvrdosti a vrypové odolnosti pomocí univerzálního tribometru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tvrdot a vrypová odolnost jsou základní charakteristiky používané při nepřímém hodnocení odolnosti materiálů vůči opotřebení. Kromě speciálních zařízení lze pro jejich hodnocení použít i univerzální tribometry, které však nemají přímo implementovány nástroje pro vyhodnocení výsledných veličin. Práce je tedy zaměřena na vytvoření metodiky měření a vyhodnocení těchto veličin.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je vytvořit metodický postup měření tvrdosti a hodnocení vrypové odolnosti kovových materiálů pomocí univerzálního tribometru.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- prostudovat relevantní technické normy popisující stanovení tvrdosti a vrypové odolnosti,
- sestavit metodiku měření a vyhodnocení na dvou univerzálních tribometrech,
- realizovat a vyhodnotit sérii ověřovacích experimentů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 6506-1. Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda. Český normalizační institut, 2006.

ČSN EN ISO 6507-1. Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda. Český normalizační institut, 2006.

ČSN EN ISO 6508-1. Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Část 1: Zkušební metoda. Český normalizační institut, 2006.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření tvrdosti a vrypové odolnosti. Tyto zkoušky se standardně vykonávají pomocí jednoúčelových zařízení. Z konstrukčního hlediska lze tyto zkoušky realizovat i pomocí univerzálních tribometrů, avšak ty nemají implementovány nástroje pro následné vyhodnocení měření. Hlavním cílem práce tedy bylo vytvořit metodický postup včetně vyhodnocení těchto zkoušek. Vytvořené metodické postupy byly následně ověřeny několika experimenty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zkouška tvrdosti, zkouška vrypové odolnosti, scratch test, Brinell, Vickers, Rockwell, univerzální tribometr

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with a hardness and scratch resistance measurement. These tests are normally performed using special devices. From a design point of view, these tests can also be performed using universal tribometers, but they do not have implemented tools for subsequent measurement evaluation. The main goal of the work was to develop a methodical procedure including evaluation of these tests. The methodological procedures were subsequently verified by several experiments.

KEY WORDS

Hardness Test, Scratch Resistance Test, Scratch Test, Brinell, Vickers, Rockwell, Universal Tribometer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE MÉ PRÁCE

URBÁŠEK, J. *Měření tvrdosti a vrypové odolnosti pomocí univerzálního tribometru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Omasta, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci Měření tvrdosti a vrypové odolnosti pomocí univerzálního tribometru vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Milan Omasta, Ph.D. a uvedl jsem v seznamu všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 18. 5. 2017

Vlastnoruční podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce, Ing. Milanu Omastovi, Ph.D., za vedení této práce, za pomoc a cenné rady nezbytné pro její vypracování. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu během studia.

OBSAH

1 ÚVOD	12
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1 Přehled metod pro měření tvrdosti a vrypové odolnosti	13
2.2 Zkoušky vnikací	14
2.2.1 Metoda Vickers podle normy ČSN EN ISO 6507	14
2.2.2 Metoda Rockwell podle normy ČSN EN ISO 6508	16
2.2.3 Metoda Brinell ČSN EN ISO 650	19
2.3 Zkoušky vrypové	23
2.3.1 Vrypová zkouška dle normy ISO 20502	25
2.3.2 Vrypová zkouška dle normy ASTM G171 – 03	29
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	32
3.1 Analýza problému	32
3.2 Cíl práce	32
4 MATERIÁLY A METODY	33
4.1 Metody	33
4.1.1 Zkušební zařízení	33
4.1.2 Metody testování vrypové odolnosti	35
4.1.3 Metody testování tvrdosti materiálu	37
4.2 Materiály	39
5 VÝSKLEDKY	40
5.1 Metodika měření	40
5.2 Výsledky měření	40
5.2.1 Scratch test s konstantním zatížením	40
5.2.2 Scratch test s progresivním zatížením	41
5.2.3 Měření tvrdosti	42
6 DISKUZE	44
6.1 Kritické zhodnocení možností použití univerzálních tribometrů	44
6.2 Porovnání výsledků	44
7 ZÁVĚR	46
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	48
SEZNAM OBRÁZKŮ	49
SEZNAM TABULEK	50
SEZNAM PŘÍLOH	51

1 ÚVOD

Tvrdotost a vrypová odolnost jsou základní charakteristiky používané při nepřímém hodnocení odolnosti materiálu vůči opotřebení. Tyto vlastnosti mají velkou roli při nepřímém vyhodnocování materiálu vůči opotřebení.

Zkouška tvrdosti patří mezi levné a nenáročné metody testování. Podstatou je vtlačení indentoru do zkušebního materiálu pod daným zatížením. Vyhodnocení se provádí měřením hloubky nebo velikosti vtisku. Tuto zkoušku lze považovat za nedestruktivní, jelikož vzniká pouze malý vtisk, tudíž ovlivňuje pouze velmi malou plochu zkušebního tělesa. Zkoušku tvrdosti lze realizovat pomocí celé řady tvrdoměrů, počínaje jednoduchými přenosnými tvrdoměry, až pomocí univerzálních digitálních tvrdoměrů. Existuje také celá řada metod vyhodnocení tvrdosti materiálu. Mezi nejznámější patří Brinellova, Vickersova a Rockwellova metoda.

Na rozdíl od zkoušky tvrdosti se zkouška vrypové odolnosti využívají převážně k hodnocení kvality velice tenkých povlakových vrstev. Tyto vrstvy se vytvářejí pomocí speciálních nástřikových technologií. Tím lze docílit lepší otěruvzdornosti, korozní odolnosti, kluzných vlastností, zvýšení životnosti materiálu a mnoho dalších vlastností. Podstata metody spočívá ve vytvoření vrypu pomocí indentoru o definované geometrii. Indentor působí na testovaný materiál daným zatížením a vzorek je posouván danou rychlostí, čímž se vytvoří vryp. Vytvořený vryp je předmětem dalšího pozorování, při němž se získají různé charakteristiky. Základní vlastností je adheze, což je schopnost povlaku přilnout na základní materiál. Testování probíhá na scratch testerech, jež mohou být vybaveny optickým mikroskopem, snímačem akustické emise a mnoho dalšími snímači. Tato metoda je mnohem mladší než zkouška tvrdosti a je předmětem dalších výzkumů.

Oba druhy zkoušek se vyhodnocují pomocí speciálních zařízení, avšak z konstrukčního hlediska tyto zkoušky lze realizovat i pomocí univerzálních tribometrů. Problémem je, že tribometry nemají přímo implementovány zkoušky a nástroje pro přímé vyhodnocení výsledných veličin. Práce je tedy zaměřena na sestavení metodiky měření a vyhodnocení výsledných veličin pomocí univerzálních tribometrů.



Obr. 1 Tvrdoměr [11]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Přehled metod pro měření tvrdosti a vrypové odolnosti

Tvrdostí materiálu rozumíme odolnost povrch vůči lokálnímu porušení cizím tělesem. Bohužel tvrdost nelze definovat jako fyzikální vlastnost. Je totiž výsledkem kombinací mnoha jiných vlastností. [2] Tvrdost lze vyjádřit obecně jako funkci [1]:

$$H = f(e, P, T, F, v, t)$$

Kde:

e	–	elastické vlastnosti zkoušeného materiálu
P	–	plastické vlastnosti zkoušeného materiálu
T	–	tvár, rozměry a tvrdost indentoru
F	–	velikost síly působící na indentor
v	–	rychlost pohybu indentoru
t	–	tření mezi indentorem a zkoušeným kovem

Tudíž je zcela nezbytné uvádět metodu a podmínky, za kterých byla zkouška vykonána. Všechny zkoušky tvrdosti lze považovat za nedestruktivní, jelikož vzniká pouze malá lokální deformovaná oblast. U měření tvrdosti existuje celá řada metod postupů testování materiálu. [2] Ty můžeme dělit dle následujících hledisek. [2,3]

Podle rychlosti působení zatěžující síly:

- Statické – jsou charakteristické vtlačováním indentoru v kolmém směru na plochu vzorku pod konstantním zatížením. Vyznačují se jednoduchostí, objektivností a přesností.
- Dynamické – označovány taky jako rázové zkoušky, kdy indentor proniká do vzorku díky rázu. Ráz je veden kolmo na testovací plochu vzorku.

Podle principu zkoušky:

- Vnikací – principem je vtlačování indentoru kolmo do povrchu zkoušeného materiálu. Měří se hloubka nebo velikost plochy vtisku.
- Vrypové – neboli tzv. scratch testy. Metoda tkví ve vytvoření vrypu, kdy je indentor vtlačován do vzorku pod určitým zatížením, které může být konstantní nebo časově proměnné, a současně je vzorek posouván konstantní rychlostí v určitém směru kolmo k indentoru. Měří se buď šířka vrypu nebo se vyhodnocuje kritické zatížení, při němž dojde k charakteristické poruše materiálu. Tato metoda má největší uplatnění u materiálů s povlaky.
- Odrazové – metoda spočívá v tom, že padající tělísko o daném tvaru (indentor), se odrazí od zkoušeného materiálu. Vyhodnocuje se výška nebo úhel odrazu. Metoda je vhodná pro velmi tvrdé materiály.
- Kyvadlové – podstatou je změřit úbytek energie kyvadla s kuličkou, které naráží do zkoušeného materiálu a zvětšuje předem vytvořený vtisk. Tyto metody se už téměř nepoužívají.

Podle účelu měření:

- Zkoušky makrotvrdomosti – při měření neuvažujeme tvrdost jednotlivých strukturních složek materiálu, tudíž se materiál měří jako celek. Zatěžující síla je vyšší než 9,807N
- Zkoušky mikrotvrdomosti – zkoušky využívají obdobných postupů, jako zkoušky makrotvrdomosti, avšak se měří tvrdost jednotlivých složek materiálu. Zatěžující síla se pohybuje v rozmezí od 0,09807 N do 9,807 N.

2.2 Zkoušky vnikací

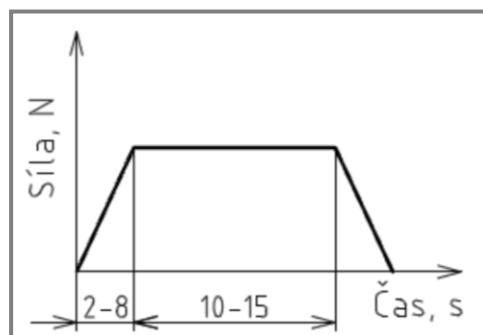
Principem vnikací zkoušky je zatlačení indentoru do povrchu vzorku. Geometrie a materiál indentoru se liší pro každou metodu. Tyto vlastnosti, stejně jako velikost zatížení, doba zatížení a další podmínky, aby bylo docíleno správného postupu zkoušky, popisuje vždy příslušná norma. Jedná se o zkoušky jednoduché, přesné, snadno reprodukovatelné, tudíž jsou také nejčastěji používány, avšak pro rozměrné součásti v provozních podmínkách je někdy nutné zvolit jiné metody. [1]

Mezi nejčastěji používané vnikací zkoušky se řadí metoda Vickers, Brinell a Rockwell. Tudíž se v následující části práce zabývám popisem těchto jednotlivých metod podle příslušné české normy.

2.2.1 Metoda Vickers podle normy ČSN EN ISO 6507 [5]

Počátek zkoušky je datován do roku 1922, kdy byla popsána pány R. L. Smithem a G. E. Sandlandem. Název získala díky tvrdoměru, který byl vyroben ve firmě Vickers. Avšak v USA je označována názvem Diamond pyramid hardness test. [3]

Principem zkoušky je vniknutí indentoru do zkušeneho materiálu pod daným zatížením a působením po určitou dobu. Indentorem je diamantový čtyřboký jehlan se čtvercovou podstavou s vrcholovým úhlem $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Vrcholový úhel byl navržen tak, aby tření mezi materiálem a indentorem bylo co nejmenší, tudíž aby co nejméně ovlivňoval měření. Tvrdost podle Vickerse je vyjádřena jako funkce poměru působícího zatížení ku vytvořené ploše vtisku. [12]



Obr. 2 Průběh zatížení, metoda Vickers [5]

Postup při měření tvrdosti podle Vickerse

Indentor je vlačováno kolmo na testovací plochu vzorku o daném zatížení. Nejčastěji se používá hodnota zkušebního zatížení 294,2 N, tedy HV 30. Nárůst na plnou hodnotu zatížení musí být lineární po dobu od 2 s do 8 s. Následný čas plného zatížení je 10 s až 15 s. Po posledním kroku se indentor odtíží a posune

se do takové polohy, aby bylo možné vyjmout zkoušený vzorek. Vtisk na vzorku je dále předmětem vyhodnocení. Průběh zatížení je vyjádřen obr. 2.

Při vyhodnocení se pomocí mikroskopu změří úhlopříčky vtisku (obr. 3). Z nich se vypočítá aritmetický průměr. Hodnota tvrdosti podle Vickerse je dána následujícím vztahem:

$$HV = 0,1891 * \frac{F}{u^2}$$

Kde:

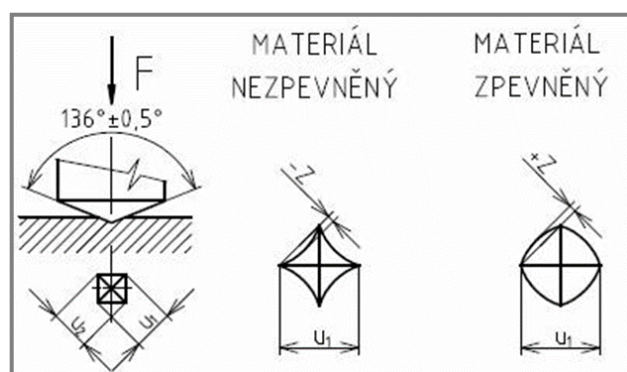
- | | | |
|----|---|------------------------------------|
| HV | - | tvrdost podle Vickerse |
| F | - | velikost zkušebního zatížení [N] |
| u | - | aritmetický průměr úhlopříček [mm] |

Průmět plochy vtisku vždy nemusí být geometricky přesného tvaru, ale může být různě deformovaný podle stupně zpevnění materiálu. V takovém případě se provádí korekce výpočtu tvrdosti. Korekce je uvedena následujícím vztahem (obr. 3).

$$HV = 0,1891 * \frac{F}{(u \pm Z * \sqrt{2})^2}$$

Kde:

- | | | |
|---|---|--|
| Z | - | vzdálenost skutečné a geometricky přesné hrany vtisku [mm] |
|---|---|--|

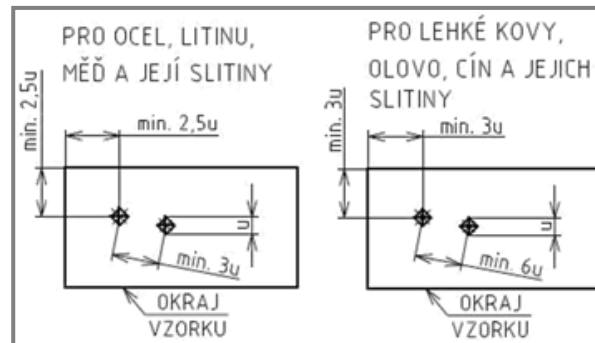


Obr. 3 Ilustrace vtisku, metoda Vickers [5]

Aby bylo měření v souladu s normou musí být splněny následující všeobecné zásady:

- Zkouška se musí provádět mezi teplotami 10 °C až 35 °C. V arbitrážních případech při teplotě 23 ± 5 °C.
- Povrch vzorku musí být čistý, hladký, bez mazadel a cizích tělísek.
- Vzorek musí být pevně uchycen, aby bylo zabráněno pohybu vzorku během zkoušky. Indentor se musí zatlačovat kolmo ke zkoušenému povrchu bez rázů a chvění.
- Doba mezi počátkem zatěžování a dosažením zátěžné síly musí být v rozmezí 2 s až 8 s. Doba působení zkušební síly musí být 10 s až 15 s.
- Tloušťka zkoušeného materiálu musí být u slitin železa nejméně 1,2 a u jiných slitin až 1,5 násobek aritmetického průměru délek úhlopříček vtisku.

Minimální vzdálenosti mezi sousedními vtisky, a mezi vtisky a okrajem vzorku jsou zobrazeny na obr. 4.



Obr. 4 Minimální vzdálenost mezi vtisky [5]

Příklad označení tvrdosti podle Vickerse: 450 HV 50/20

Kde:

- 450 ... hodnota tvrdosti
- HV ... tvrdost podle Vickerse
- 50 ... zkušební zatížení 50 kg (490,5 N)
- 20 ... doba zatížení 20 s

Tato metoda je velice přesná, tudíž je vhodná zejména pro laboratorní účely. Lze ji aplikovat na tvrdé i měkké materiály a výhodou je, že má pouze jednu stupnici. Metoda teoreticky nezávisí na použití zátěžné síly, jelikož vtisky jsou si geometricky podobné, avšak pouze v určitém rozsahu zátěžné síly. Nevýhodné z hlediska měření jsou malé vtisky na hrubozrnných nebo nehomogenních vzorcích, kde může docházet k velikému rozdílu hodnot naměřené tvrdosti materiálu. Další nevýhodou jsou vysoké požadavky testovaného materiálu na kvalitu povrchu. [1,2]

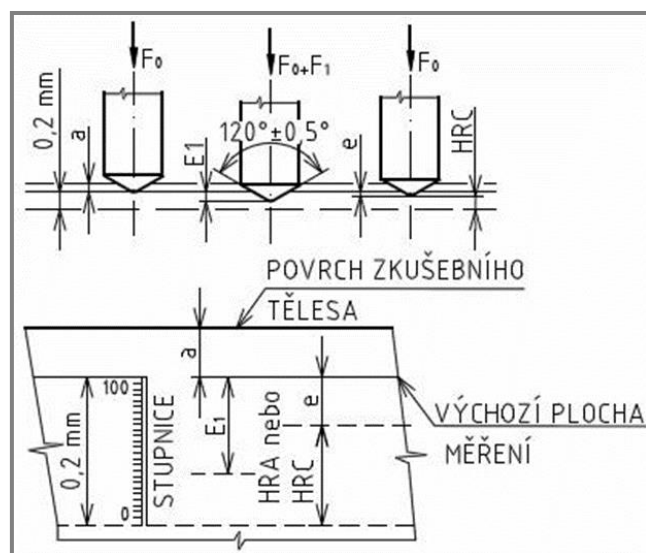
2.2.2 Metoda Rockwell podle normy ČSN EN ISO 6508 [6]

Metodu vyvinul S. P. Rockwell v roce 1922. Rozdíl oproti metodě podle Vickerse nebo Brinella spočívá v tom, že se neměří plocha vytvořeného vtisku, nýbrž se měří hloubka vtisku. [1]

Principem zkoušky je vtlačení indentoru, kterým je diamantový kužel nebo kalená kulička, do vzorku. Kulička může být dvojnásobně průměru, buď 1/16" (1,5875 mm) nebo 1/8" (3,175 mm). V případě kužele je jeho vrcholový úhel $120^\circ \pm 0,5^\circ$ a poloměr zaoblení špičky 0,2 mm. Jak již bylo výše zmíněno, tvrdost vychází z hloubky vytvořeného vtisku. Nejdříve se aplikuje malé tzv. předběžné zatížení a posléze se aplikuje zkušební zatížení. Změřením rozdílu hloubek vtisků před a po zkušebním zatížení se stanoví tvrdost materiálu. Aplikací předběžného zatížení se odstraní vlivy povrchové vrstvy, tudíž nejsou kladeny tak velké požadavky na hladký povrch. [12]

Postup při měření tvrdosti podle Rockwella

Nejprve se aplikuje předběžné zatížení F_0 , jehož účelem je odstranit vlivy povrchové vrstvy. Indentor vnikne do hloubky a , následně se hloubkoměr nastaví na nulu. Poté je vzorek zatížen plným zatížením F_1 , celková hodnota je tedy je $F = F_0 + F_1$ a indentor vnikne do hloubky $a + E_1$. Hloubka vtisku je tvořena plastickou i elastickou deformací. Po určitém čase, který je dán normou, se indentor odtíží opět na předběžné zatížení F_0 . Tím vymizí elastická složka deformace a indentor se ustaví v hloubce e . Popis průběhu zkoušky a odečet správných hodnot znázorňuje obr. 5.



Obr. 5 Průběh zkoušky Rockwell [6]

Pomocí hodnoty e stanovíme tvrdost dle Rockwella:

$$HRA, HRC, HRD = 100 - \frac{e}{0,002}$$

$$HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK = 130 - \frac{e}{0,002}$$

$$HRN, HRT = 100 - \frac{e}{0,001}$$

Kde:

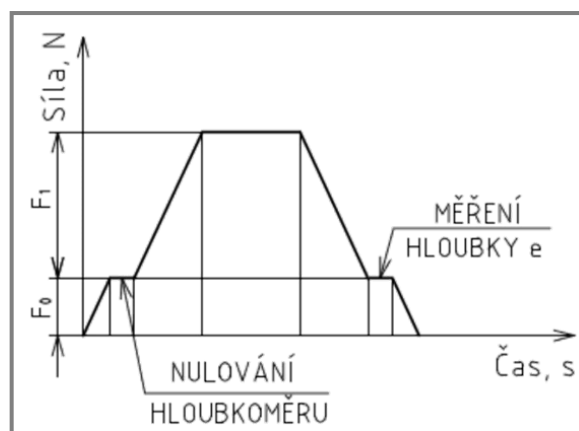
- HRx - tvrdost dle Rockwella, kde symbol x značí stupnici tvrdosti
- e - trvalá hloubka vtisku [mm]

Aby bylo měření v souladu s normou musí být splněny následující všeobecné zásady:

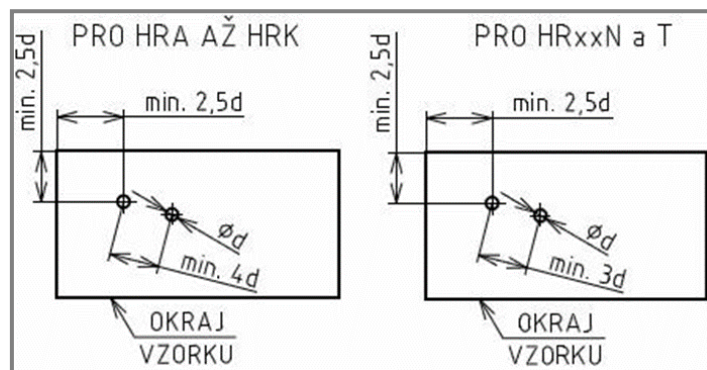
- Zkouška se musí provádět mezi teplotami 10 °C až 35 °C. V arbitrážních případech při teplotě 23 ± 5 °C.
- Povrch vzorku musí být čistý, hladký, bez mazadel a cizích tělísek.
- Vzorek musí být pevně uchycen, aby bylo zabráněno pohybu vzorku během zkoušky. Indentor se musí zatlačovat kolmo ke zkoušenému povrchu bez rázů a chvění.
- Tloušťka vzorku musí být nejméně desetinásobek hodnoty hloubky vtisku e .

- Doba hlavního zatížení musí být v rozmezí od 2 s do 8 s u metod HRA až HRK. U metod HRxx N a HRxx T 1 s až 8 s.
- Doba působení celkového zatížení je:
 - 1 s až 3 s u materiálů, které nevykazují závislost plastické deformace na čase,
 - 1 s až 5 s u materiálů, které vykazují omezenou závislost plastické deformace na čase,
 - 10 s až 15 s u materiálů, které vykazují silnou závislost plastické deformace na čase.

Časový průběh zkoušky je znázorněn na obr. 6. Minimální vzdálenosti mezi sousedními vtisky, a mezi vtisky a okrajem vzorku jsou zobrazeny na obr. 7.



Obr. 6 Časový průběh zkoušky Rockwell [6]



Obr. 7 Minimální vzdálenost mezi sousedními vtisky [6]

Značení výsledků tvrdosti se odvíjí od použité stupnice. Nejfrekventovanější jsou metody HRA, HRB a HRC. Pro stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, K se používá značení HRx, kde x nahrazuje dané označení stupnice. U stupnic N a T, je značení doplněno velikostí celkového zkušebního zatížení v [kg] a značkou stupnice. Tyto se převážně používají pro měření povrchové tvrdosti. Nejfrekventovanější metody jsou HRA, HRB a HRC. [3]

Příklady označení naměřené tvrdosti podle Rockwella:

60 HRA tvrdost je 60 pro stupnici A

70 HR 30 N tvrdost je 70 pro stupnici N, kdy zatížení je 294,2N (30 kp)

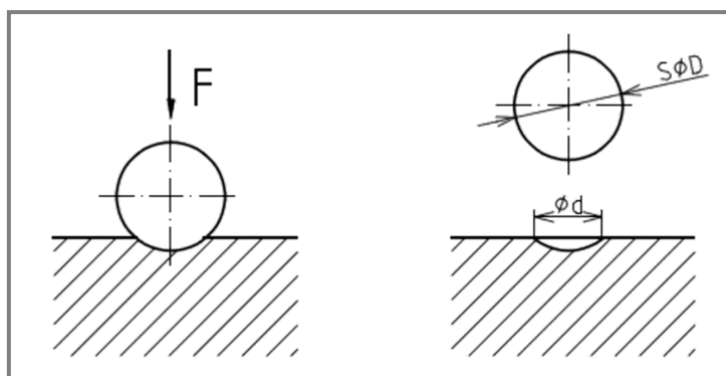
Rockwellova metoda měření tvrdosti je velice rychlá a pohodlná, jelikož hodnotu lze přímo odečíst z tvrdoměru, tudíž není třeba měřit velikost vtisku nebo používat tabulky. Její uplatnění je při rychlé a hromadné kontrole výrobků. Dále lze použít při vyhodnocování tvrdosti povrchových zpevněných vrstev, velice tenkých pásů a plechů (s tloušťkou pod 0,7 mm). Avšak nevýhodou je menší přesnost a citlivost než u metod Vickers a Brinell. [1,2]

2.2.3 Metoda Brinell ČSN EN ISO 650 [4]

2.2.3

Zkouška vznikla roku 1900, kdy byla prezentována švédským inženýrem J. A. Brinellem na druhém mezinárodním kongresu pro zkoušení materiálu v Paříži. Ve své době tato metoda sklídila veliký úspěch a stala se nejrozšířenější metodou hodnocení tvrdosti. V dnešní době už není její užití tak časté, nicméně je využívána dodnes. Metoda je vhodná pro měkké až středně tvrdé materiály. Jelikož je předmětem měření veliký objem materiálu, je vhodná i pro kovy s heterogenní strukturou. [3]

Principem zkoušky je vtažení indentoru do povrchu vzorku danou silou po určitou dobu. Tvrdost materiálu se stanoví na základě použité síly a velikosti vtisku. Pro měření měkkých materiálů (do 450 HB) se jako indentor používá kalená ocelová kulička, při měření materiálů s předpokládanou vyšší hodnotou tvrdosti (do 650 HB) se používá kulička ze slinutého karbidu. Pro zkoušku se používají kuličky o průměrech 10; 5; 2,5; 1 mm. [12] Princip zkoušky je zobrazen na obr. 8.



Obr. 8 Princip zkoušky dle Brinella [4]

Postup při měření tvrdosti podle Brinella

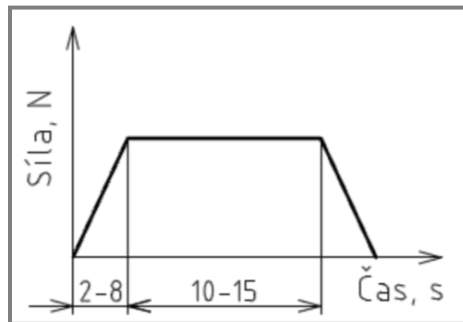
Indentor je vtačován kolmo na testovací plochu vzorku o daném zatížení. Růst zatížení je lineární a plné hodnoty musí dosáhnout v rozmezí 2 s až 8 s. Doba působení plné hodnoty zatížení je 10 s až 15 s u slitin železa (obr. 9), avšak u neželezných slitin může být 10 s až 180 s dle druhu materiálu. Následně se indentor odtáhne a posune se do takové polohy, aby bylo možné vyjmout zkoušený vzorek.

Při vyhodnocení se pomocí mikroskopu změří dva na sebe navzájem kolmé průměry vtisku, kdy jejich rozdíl nesmí být větší jak 5% menšího z nich. Z nich se stanoví aritmetický průměr d . Hodnota tvrdosti se určí dle následujícího vztahu:

$$HB = 0,102 * \frac{2 * F}{\pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Kde:

- F - zkušební zatížení [N]
- D - průměr kuličky [mm]
- d - střední hodnota průměru vtisku [mm]



Obr. 9 Časový průběh zkoušky Brinell [4]

V této metodě je důležité správně zvolit zatížení F s ohledem na testovaný materiál a průměr indentoru D . Důvodem je, že výsledná hodnota tvrdosti je závislá na velikosti působícího zatížení. Tudíž pokud se bude měnit zatížení, bude se měnit i naměřená hodnota tvrdosti. Tuto závislost znázorňuje obr. 10. Tento problém je způsoben tím, že tvar vtisku si nezachovává geometrickou podobnost. Ze závislosti plyne, že křivka tvrdosti má mezi body A a B maximum, tudíž v rozmezí hodnot sil F_1 a F_2 se hodnoty naměřené tvrdosti relativně nemění. Empiricky bylo dokázáno, že maximální hodnoty tvrdosti leží v rozsahu [1]:

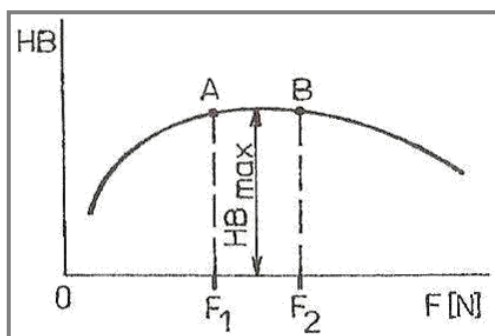
$$\frac{d}{D} = 0,25 \div 0,6$$

Aby byl zachován princip geometrické podobnosti, je nutné vyjádřit sílu F jako:

$$F = k * D^2$$

Konstanta k zahrnuje druh zkoušeného materiálu, aby byla dodržena podmínka poměru d/D . Konstanta k může nabývat pěti hodnot dle daného zkoušeného materiálu. Její hodnoty jsou znázorněny v tabulce 1.

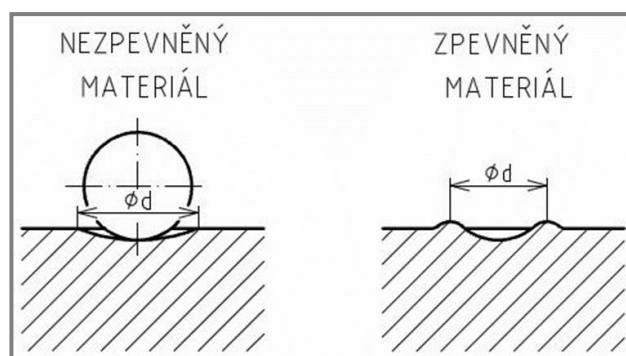
Plocha vtisku může být deformovaná podle stupně zpevnění materiálu. Způsob měření průměrů vtisků je znázorněn obr. 11.



Obr. 10 Závislost tvrdosti na zatížení [12]

Tab. 1 Volba konstanty k dle testovaného materiálu [1]

Materiál	Konstanta k	Rozsah tvrdosti HB
železo, ocel, litina, vysokopevné slitiny	30	96 ÷ 450
měď, nikl a jejich slitiny	10	10 32 ÷ 200
hliník, horčík, zinek a jejich slitiny	5	16 ÷ 100
ložiskové kovy	2,5	8 ÷ 50
cín, olovo	1	3,2 ÷ 20

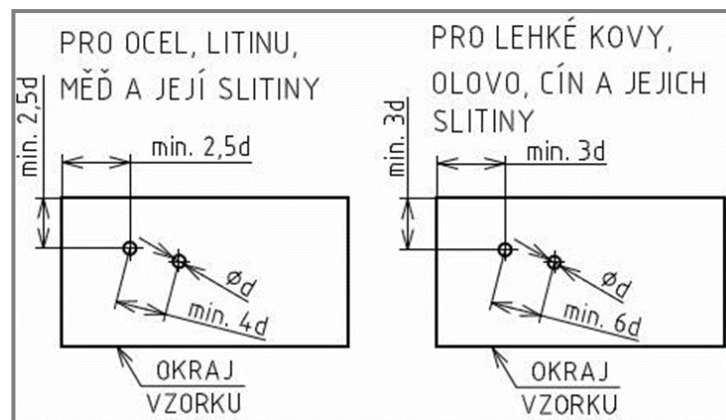


Obr. 11 Průměr vtisku dle zpevnění materiálu [12]

Aby bylo měření v souladu s normou musí být splněny následující všeobecné zásady:

- Zkouška se musí provádět mezi teplotami 10 °C až 35 °C. V arbitrážních případech při teplotě 23 ± 5 °C.
- Povrch vzorku musí být čistý, hladký, bez mazadel a cizích tělísek.
- Průměr indentoru je přednostně 10 mm, popřípadě 5 mm, 2,5 mm nebo 1 mm
- Vzorek musí být pevně uchycen, aby bylo zabráněno pohybu vzorku během zkoušky. Indentor se musí zatlačovat kolmo ke zkoušenému povrchu bez rázů a chvění.
- Doba mezi počátkem zatěžování a dosažením zátěžné síly musí být v rozmezí 2 s až 8 s. Doba působení zátěžné síly musí být 10 s až 15 s pro slitiny železa, 10 až 180 s pro neželezné kovy a jejich slitiny.
- Zatížení musí být zvoleno tak, aby poměr $d/D=0,25-0,6$
- Průměr vtisku se měří ve dvou na sebe navzájem kolmých směrech. Pro hodnocení tvrdosti se stanoví jejich střední hodnota.
- Tloušťka zkoušeného materiálu musí být nejméně desetinásobek hloubky vtisku.

Minimální vzdálenosti mezi sousedními vtisky, a mezi vtisky a okrajem vzorku jsou zobrazeny na obr. 12.



Obr. 12 Minimální vzdálenost mezi sousedními vtisky [4]

Příklad označení tvrdosti podle Brinella: 300 HBW 10/500/30

Kde:

- 300 – hodnota tvrdosti
- HBW – tvrdost podle Brinella měřená kuličkou z tvrdokovu
- 10 – průměr indentoru ($D = 10 \text{ mm}$)
- 500 – zkušební zatížení 500 kg (4903,5 N)
- 30 – doba zatížení 30 s

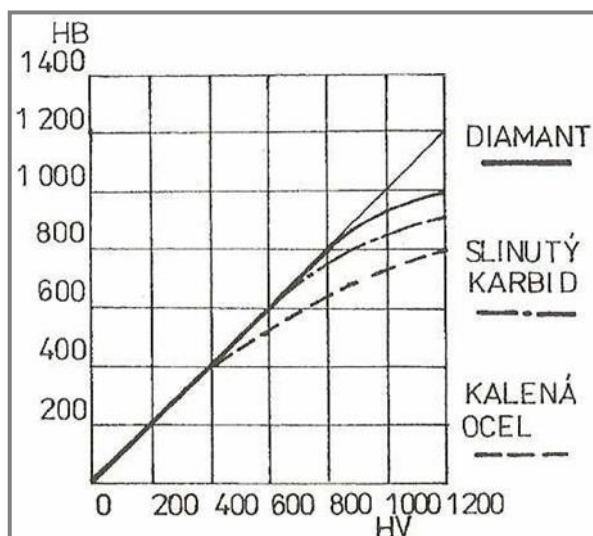
Další aplikací této metody je možnost určení mezi pevnosti [12]:

$$R_m = c * HB$$

Kde c je konstanta zahrnující druh zkoušeného materiálu, kde platí:

- uhlíkové a nízkolegované oceli $c = 3,4$ až $3,6$,
- austenitická vyžíhaná ocel $c = 3,7$ až $4,0$,
- měď a její slitiny $c = 4,0$ až $5,0$

Avšak výpočet je pouze přibližný, jelikož vlastnosti povrchu vzorku nemusí odpovídat vlastnostem celého průřezu zkušební tyče. Dále lze hodnoty tvrdosti podle Brinella (do 400 HB), převádět na hodnoty tvrdosti podle Vickerse a naopak. Tento vztah znázorňuje obr. 13. [12]



Obr. 13 Převod hodnot Brinell na Vickers [12]

Tato metoda je vhodná zejména pro měkké a středě tvrdé materiály. Pro přesné měření je třeba použít indentor o průměru 10 mm a co největší zátěžnou sílu, avšak je nutné počítat s většími vtisky. Výhodou je, že při velkých vtiscích není kladen tak velký důraz na kvalitně upravený povrch. Taktéž je vhodná pro materiály s heterogenní strukturou. [3]

2.3 Zkoušky vrypové

Principem vrypové zkoušky neboli scratch testu, je vytvoření vrypu na zkoušeném materiálu. Indentor o definované geometrii působí daným zatížením na vzorek a současně je vzorek posouván plynulým pohybem ve směru kolmém na indentor. Touto kombinací se vytvoří vryp, který je předmětem pozorování. V této metodě během vytváření vrypu může být zatížení konstantní nebo lineárně rostoucí, avšak lze zvolit i různé modifikace, např. při konstantní síle se skokovými přírůstky zatížení.

2.3



Obr. 14 Vrypy zhotovené pomocí scratch testeru [10]

Při scratch testu se kromě zátěžné normálové síly může dále zaznamenávat velikost tangenciální (třecí) síly, hloubka vrypu nebo akustická emise, avšak to záleží, zda je

přístroj opatřen snímači daných veličin. Uplatnění sratch testů spočívá především v posuzování mechanických vlastností tenkých tvrdých vrstev a povlaků. Mechanismus porušení povrchové vrstvy souvisí s řadou různých nezávislých faktorů, tudíž je řazen mezi semi-kvantitativní metody zkoušení povlaků. Velký vliv na měření má tvar indentoru. Se snižujícím se jeho poloměrem dochází k lepší lokalizaci deformace, tudíž snazší detekci kritických míst, avšak vrůstá jeho opotřebení, tedy se snižuje přesnost měření. [9]

Faktory ovlivňující scratch test se dělí na vnitřní a vnější [9]:

Vnitřní faktory závisí především na kalibraci přístroje a jeho nastavení. Sem se řadí:

- poloměr hrotu
- opotřebení
- rychlost zatěžování
- rychlost vrypu
- tuhost přístroje a jeho konstrukce

Vnější faktory jsou závislé na vlastnostech materiálu vzorku. Mezi ně patří:

- koeficient tření
- drsnost povrchu
- vlastnosti substrátu (tvrdost, elastický modul)
- vlastnosti povlaků (tloušťka, tvrdost, elastický modul, zbytkové napětí)

Při scratch testu se nejčastěji vyhodnocuje zátěžná síla, která vede k odtržení povlakové vrstvy, tvorbě trhlin, či jiných druhů porušení. Samotné vyhodnocení je subjektivní záležitost, tudíž by mělo být provedeno pouze jednou osobou. Tato osoba si zvolí charakteristické znaky, pomocí níž bude při optické analýze určovat kritická zatížení. Charakter porušení úzce souvisí s druhem materiálu vzorku. Některé typy porušení nemusí být identifikované pomocí mikroskopu, tudíž je vhodné použít co nejvíce možných metod k vyhodnocení daného testu. [9]

Pro naše geografické území není zkouška vrypové odolnosti nikterak normována, tudíž se v následující části zabývám popisem mezinárodní normy ISO a americké normy pro testování materiálu ASTM.

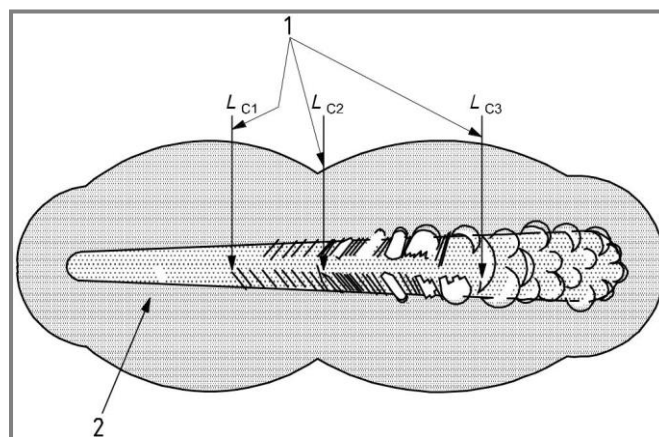


Obr. 15 Scratch tester [13]

2.3.1 Vrypová zkouška dle normy ISO 20502 [7]

Tato norma popisuje metodiku měření a vyhodnocování adheze keramicky povlakovaných materiálů. Během testu se může aplikovat konstantní či progresivní zatížení kolmo k rovině povrchu vzorku. Metoda je vhodná pro hodnocení keramických povlaků až do tloušťky 20 μm , ale také může být také vhodná pro hodnocení jiných povlaků jiných tloušťek. Norma je určena pro síly v rozsahu od 1 N do 100 N, avšak tyto postupy mohou být použity i na síly jiných rozsahů, nicméně je nutné zvolit vhodnou kalibraci přístroje.

Principem je vytvoření vrypu pomocí indetoru, kterým nejčastěji je diamantový kužel, který se svojí geometrií shoduje s indentorem metody Rockwell C. Vyhodnocení se provádí pomocí přímého pozorování mikroskopem. Někdy se také může využít snímač akustické emise, či snímač třecí síly. Výsledkem vyhodnocení je kritická normálová síla zatížení L_C (obr. 16), při níž vznikne charakteristické porušení povlaku. V závislosti na vlastnostech materiálu těchto kritických sil může být několik, kdy každá kritická síla je charakteristická daným druhem poškození.



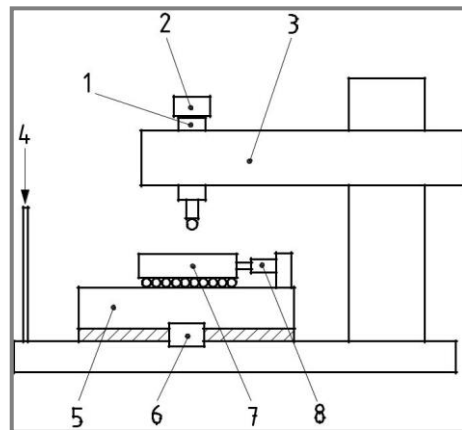
Obr. 16 Určení kritické síly [7]

Požadavky pro realizaci zkoušky

Měřicí přístroj musí umožnit současné pevné uchycení vzorku i indentoru, aplikaci zátěžné a hnací síly k vytvoření vrypu. Zařízení může být dále vybaveno měřičem akustické emise, či snímačem tečné složky síly, avšak pomocí těchto zdrojů nelze zcela spolehlivě určit kritickou sílu. Tyto techniky mohou mít pouze výstražný charakter, a to pouze po provedení řady experimentů na stejném typu povlaku. Hlavním zdrojem informací musí být optické pozorování vrypu pomocí mikroskopu. Aby bylo měření v souladu s normou, musí být zařízení kalibrováno dle požadavků, které jsou součástí této normy.

Indentor se ve většině případů shoduje s geometrií indentoru Rockwell C. Indentor by měl být pravidelně kontrolován, zdali je zachována jeho geometrie. Pokud pozorujeme poškození při zvětšení 200x a nižším, pak by měl být indentor vyměněn a na výsledky posledních testů provedených tímto indentorem bychom neměli brát zřetel. Pokud při konstantním zatížení narůstá třecí síla, je to předpoklad poškození indentoru. Nepřesnosti tvaru indentoru Rockwell C a výrobní vady jsou hlavními příčinami chyb u scratch testů. Užitím poškozeného indentoru může vést k různým výsledkům kritických sil, v závislosti na směru vedením vrypu. Tudiž je

nezbytné často kontrolovat indentor, aby byly případně včas detekované defekty. Defekty jsou nejčastěji tvaru kráterů nebo ve formě prstenců, které jsou jednoduše viditelné pomocí světelného mikroskopu při zvětšení 100x a větší. Vzhledem k třecím vlastnostem mezi vzorkem a indentorem, které jsou citlivé na podmínky okolního prostředí, jsou doporučené podmínky teploty od 20 °C do 24 °C a relativní vlhkosti od 40 % do 60 %. Schéma měřicího zařízení popisuje obr. 17.



Obr. 17 Schéma scratch testeru [7]

Kde:

- 1 Držák indentoru
- 2 Snímač normálové síly
- 3 Horní rameno
- 4 Referenční základna
- 5 Pojezd vzorku v rovině XY
- 6 Pohon pro pojezd vzorku v rovině XY
- 7 Stolek pro upnutí vzorku
- 8 Snímač tečné síly

Reprezentativní vzorek by měl splňovat následující požadavky:

- Substrát, rozhraní a povlak by měli být homogenní, aby reprezentovali vlastnosti celého kompozitu, jakožto mikrostrukturu, hustotu, zbytková napětí a tloušťku, podél celého vrypu.
- Drsnost povrchu vzorku musí být stejná v celé oblasti testování a hodnota R_a , měřená podle normy ISO 4288, by neměla přesáhnout hodnotu 0,5 μm .
- Testovaný povrch vzorku musí být vždy kolmý k hrotu, dále musí být zbaven nečistot, jako jsou olej, mastnota a vlhkost.
- Během měření by měl být vzorek a indentor bez otisků prstů.

Metody měření

Norma popisuje 3 různé metody měření, kdy každá je vhodná pro získání určité vlastnosti vzorku.

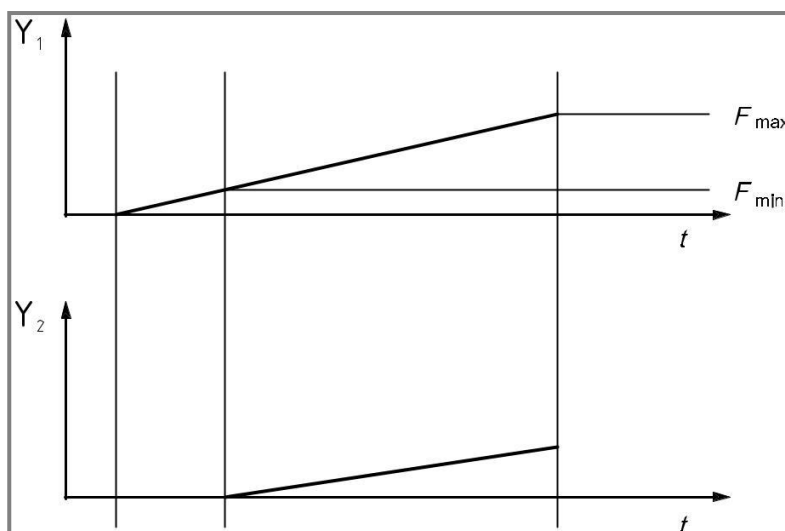
- Progresivní sratch test (PFST) – aplikovaná normálová síla lineárně narůstá

- Konstantní scratch test (CFST) – aplikovaná normálová síla je v průběhu jednoho vrypu konstantní, s krokovým přírůstkem mezi jednotlivými vrypy
- Opakovaný scratch test (MPST) – na vzorek v rámci jednoho vrypu je aplikovaná vícekrát konstantní síla

Nejčastěji je využíván jako první metoda PFST, kdy se získá kritická síla. Následně se aplikuje CFST, který umožní lepší poznání chování vzorku. CFST je však velice časově náročný. MPST je vhodný pro křehké povlaky, pokud chceme posuzovat adhezní vlastnosti, nicméně jeho náročnost je ze všech metod největší.

Postup měření metody progresivní scratch test - PFST

Přivedeme počáteční zatížení na indentor. Nastavíme rychlost růstu zatížení a rychlost pohybu vzorku (doporučené hodnoty jsou 100 N/min a 10 mm/min) (obr. 18). Provedeme vryp a určíme kritickou sílu L_C definující určité selhání povlaku. Pokud kritická síla L_C je nižší než 10 N, snížíme hodnoty zatěžování na 10 N/min.



Obr. 18 Závislost zatížení a posuvu na čase, PFST [7]

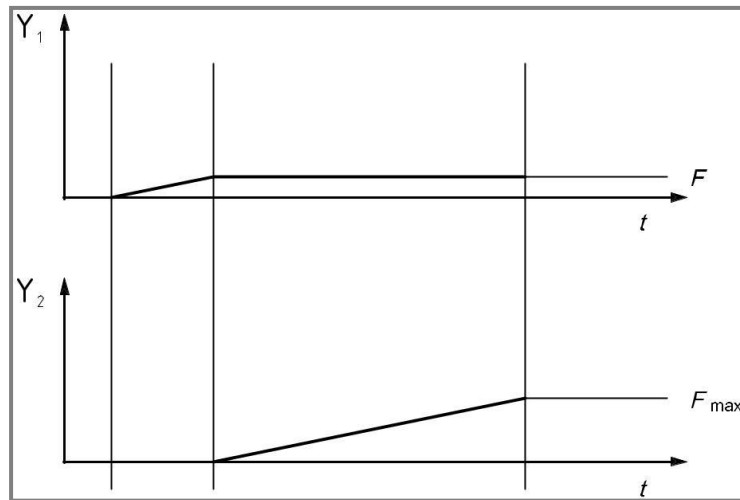
Kde:

t	-	čas [s]
Y_1	-	normálová síla [N]
Y_2	-	vzdálenost indentoru od počátku vrypu [mm]
F_{max}	-	maximální síla [N]
F_{min}	-	minimální síla [N]

Postup měření metody konstantní scratch test - CFST

Je-li zařízení schopno vykonat PFST metodu, využijeme ji ke zhotovení vrypu, a vytyčíme si oblast zájmu zatížení. Vzorek umístíme do takové polohy, aby další vryp byl vytvořen na nepoškozené ploše. Užitím jedné pětiny kritické síly, kterou jsme získali PFST metodou, vytvoříme sérii vrypů s postupným růstem normálové síly mezi jednotlivými vrypy. Rychlost posunutí je 10 mm/min a délka vrypu je 10 mm

(obr. 19). Pokud chceme následně důkladně pozorovat určitou oblast, zhotovíme další sérii vrypů s nižším růstem zatížení mezi jednotlivými vrypy.



Obr. 19 Závislost zatížení a posuvu na čase, CFST [7]

Kde:

t	-	čas [s]
Y_1	-	normálová síla [N]
Y_2	-	vzdálenost indentoru od počátku vrypu [mm]
F_{max}	-	maximální síla [N]
F_{min}	-	minimální síla [N]

Postup měření metody opakovaný scratch test - MPST

Pevně upneme vzorek do přístroje a přivedeme indentor do kontaktu s povrchem vzorku. Vytvoříme vryp dle PFST a vytyčíme si přibližnou kritickou sílu. Aplikací 50 % kritické síly, určené z PFST, vytvoříme vryp rychlostí 10 mm/min o délce nejméně 3 mm. Tento postup opakujeme v rámci jednoho vrypu do té doby, dokud nedojde k selhání povlaku.

Vyhodnocení

Pro vyhodnocení existuje řada metod, avšak pouze pozorování vrypu mikroskopem je schopno spolehlivě rozlišit jednotlivé typy porušení. Pro snadnější standardizované vyhodnocení výsledků je sestaven atlas poruchových stavů, který je součástí této normy, jakožto příloha.

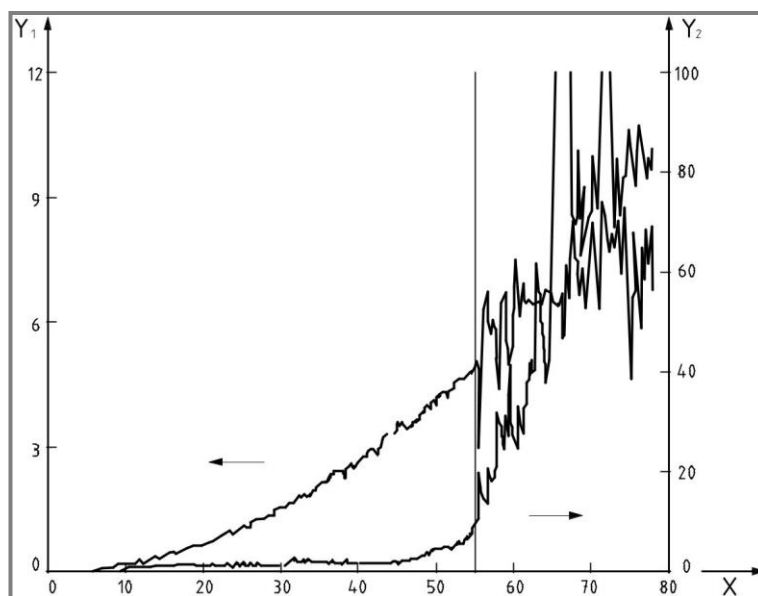
Pro vyhodnocení testu pomocí mikroskopu je nejprve nutné odstranit úlomky a otřepy vzniklé předchozím testem. Dále si vytyčíme oblast zájmu a vytvoříme si její náčrt nebo digitální podobu, popřípadě je možné se odkázat na obrázek z atlasu této normy. U vrypů zhotovených PFST vypočítáte kritickou sílu dle vztahu:

$$L_c = l * \frac{s}{p}$$

Kde:

- L_c - kritická síla [N]
- l - vzdálenost místa selhání od počátku vrypu [mm]
- s - rychlost růstu zatížení [N/min]
- p - rychlost posuvu [mm/min]

Určení kritické síly pomocí snímače akustické emise nebo třecí síly se určí z ostré změny sledované veličiny (obráz. 20).



Obr. 20 Určení L_c pomocí třecí síly nebo akustické emise [7]

Kde:

- X - normálová síla [N]
- Y_1 - třecí síla [N]
- Y_2 - akustická emise (dle příslušných jednotek)

Z důvodu vysoké pravděpodobnosti výskytu statistické chyby při určení kritické síly získané v rámci jednoho měření, je žádoucí zhotovit nejméně 5 testů, které nejsou vzájemně ovlivněny.

2.3.2 Vrypová zkouška dle normy ASTM G171 – 03 [8]

Norma popisuje laboratorní postup určení odolnosti tvrdých materiálů vůči poškrábání. V rámci určitých limitů, které tato norma udává, je metoda vhodná pro široké spektrum materiálů, jakožto kovy, slitiny, keramika, polymery a materiály s povlakem. Zkouška není určena k posuzování adheze povlakové vrstvy. Obecně je vrypová odolnost vyjádřena poměrem zatížení k vytvořené ploše vrypu.

Metoda spočívá ve vytvoření vrypu do materiálu pomocí hrotu konstantním zatížením. Dle daného zatížení a šířky vrypu určíme hodnotu odolnosti proti poškrábání. Dle požadavků může být během testů zaznamenávána třecí síla, pomocí které lze určit koeficient odporu hrotu. Zkouška se obvykle provádí za pokojových

podmínek a v nemazaném stavu. Avšak je možné provést zkoušku za zvýšených teplot, či za přítomnosti mazání, nicméně je nutné zmínit tyto podmínky ve zkušebním protokolu. Zkouška je citlivá na vlhkost a další atmosférické podmínky, proto je důležité tyto data sledovat a popřípadě je zaznamenat do protokolu o zkoušce. Odolnost materiálu proti otěru může být ovlivněna rychlostí deformace, tudíž se tento test provádí za pomalých rychlostech posuvů. Další výhodou je, že malými rychlostmi minimalizujeme možné účinky tepla vzniklého třením.

Požadavky na korektní průběh zkoušky

Testovací zařízení musí být schopno pevně uchytit indentor a vzorek, přenést zatížení a zároveň posunovat vzorek konstantní rychlostí, a dále změřit šířku vrypu. Dále může být vybaveno snímačem tečné síly. Geometrie a materiál indentoru by měla stejná jako v případě Rockwell C.

Vzorek by měl být připraven takovým způsobem, aby vhodně reprezentoval pozorované veličiny. Jako nevhodný vzorek se považuje takový, jehož drsnost nebo porozita je tak velká, že okraje vrypu jsou nezřetelné nebo zoubkované, dále pokud hrot nemůže přejet plochu bez přeskokování nebo zachytávání v kapsách.

Jelikož je možné testovat celou řadu materiálu, nelze zcela jednoznačně určit správný postup čištění. Povrch vzorku by měl být zbaven otřepů, mastnot, otisků prstů nebo jiných nečistot. Kovy a slitiny mohou být čištěny pomocí nepolárních rozpouštědel. Plasty vyžadují často specifický způsob čištění, jelikož kontaktem s rozpouštědly by mohli změnit své vlastnosti. Způsob čištění by měl být zaznamenán ve zkušebním protokolu.

Je žádoucí zkontrolovat indentor pomocí mikroskopu, či jiné topografické metody, aby byly odhaleny případné defekty nebo ulpívající materiál na povrchu indentoru. Jako postačující metoda vyhovuje očištění indentoru pomocí hadříku namočeného v acetonu, či jiném čistícím přípravku.

Zatěžující síla se volí tak, aby bylo možné změřit šířku vrypu, avšak v takových mezích, aby nezpůsobovala praskání, odlupování nebo jiné hrubé poškození povrchu. Nejlepší možností je vytvořit sérii vrypů, vždy pomocí jiné zatěžující síly, a posléze určit vhodné zatížení.

Délka vrypu by měla být větší než 5 mm. Vryp nemusí být přímý, ale může být i tvaru oblouku. Rychlost posuvu volíme v rozmezí od 0,2 mm/s do 5 mm/s, a rychlost musí být v rámci měřené části konstantní.

Postup zkoušky

Opatrně přivedeme indentor do kontaktu se vzorkem tak, aby nedošlo k rázu. Aplikujeme plné zatížení a následně aktivujeme pojezdový pohon, čímž vytvoříme vryp požadované délky. Oddálíme indentor od vzorku a přejedeme s ním na místo kde vytvoříme další vryp rovnoběžně s předchozím. Nejmenší přípustná vzdálenost dvou vrypů je pětinašobek šířky vytvořeného vrypu. Tento postup opakuje dle potřeby, avšak nejméně třikrát.

Vyhodnocení měření

Měření šířky vrypu provádíme pomocí mikroskopu nebo jiného vhodného zařízení, kdy měříme šířku každého vrypu na třech různých místech, vyjma začátku nebo konce vrypu (obr. 21). Výpočet hodnoty vrypové odolnosti je dán vztahem:

$$HS_p = \frac{8 F_z}{\pi w^2}$$

Kde:

HS_p	-	Hodnota vrypové odolnosti [Pa]
F_z	-	velikost normálové síly [N]
w	-	šířka vrypu [mm]

Pokud je normálová síla vyjádřena jako hmotnost zatížení, je výpočet dán vztahem:

$$HS_p = \frac{24,98 m}{x^2}$$

Kde:

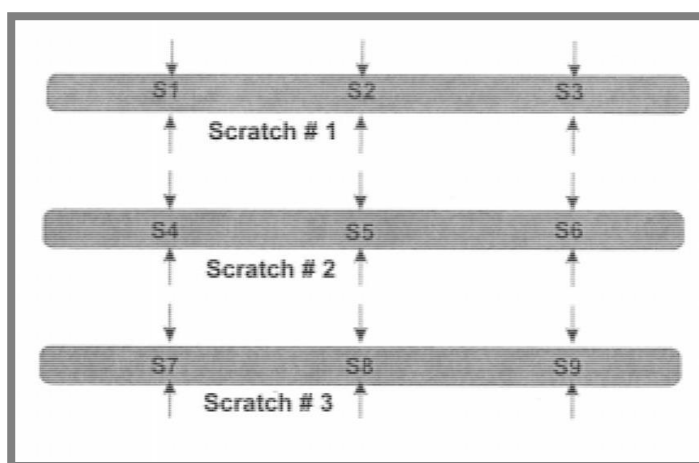
m	-	hmotnost zatížení [kg]
x	-	šířka vrypu [μm]

Dále lze stanovit hodnotu koeficientu odporu hrotu dle vztahu:

$$D_{sc} = \frac{F_{scr}}{F_z}$$

Kde:

D_{sc}	-	koeficientu odporu hrotu [-]
F_{scr}	-	průměrná hodnota třecí síly podél celého vrypu [N]
F_z	-	velikost normálové síly [N]



Obr. 21 Místa měření šířky vrypu [8]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Tvrdost a vrypová odolnost jsou základní charakteristiky používané při nepřímém hodnocení odolnosti materiálu vůči opotřebení. Realizace zkoušek se provádí především pomocí jednoúčelových speciálních zařízení. Avšak z technického hlediska lze tyto zkoušky vykonat pomocí univerzálních tribometrů, které ale nemají přímo implementovány nástroje pro vyhodnocení výsledných veličin. Práce je tedy zaměřena na vytvoření metodiky měření a vyhodnocení těchto veličin pomocí univerzálních tribometrů, které jsou součástí výzkumné laboratoře Ústavu Konstruování. Jelikož jsou zkoušky vrypové odolnosti mnohem komplexnější a komplikovanější, je experimentální část z větší části orientována právě na ně.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je vytvořit metodický postup měření tvrdosti a hodnocení vrypové odolnosti kovových materiálů pomocí univerzálního tribometru.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- prostudovat relevantní technické normy popisující stanovení tvrdosti a vrypové odolnosti,
- sestavit metodiku měření a vyhodnocení na dvou univerzálních tribometrech,
- realizovat a vyhodnotit sérii ověřovacích experimentů.

4 MATERIÁLY A METODY

4

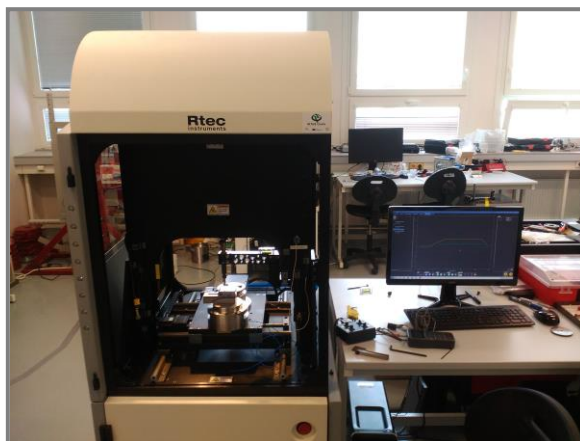
4.1 Metody

4.1

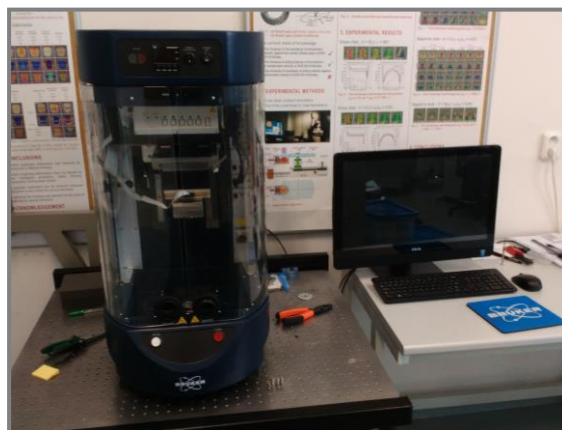
4.1.1 Zkušební zařízení

4.1.1

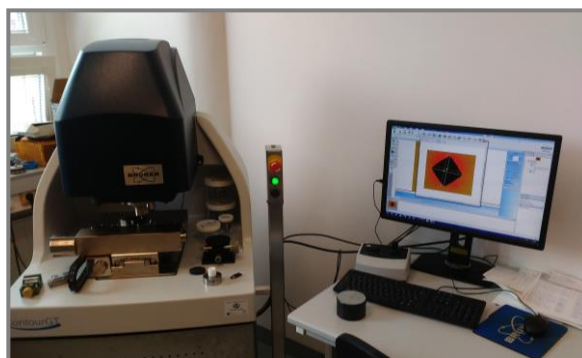
Experimentální část práce byla vykonána pomocí dvou univerzálních tribometrů MFT Rtec Instruments (obr. 22) a UMT Tribolab Bruker (obr. 23). Pro vyhodnocení metod byl dále použit optický profilometr Bruker (obr.24) a optický mikroskop.



Obr. 22 Tribometr Rtec

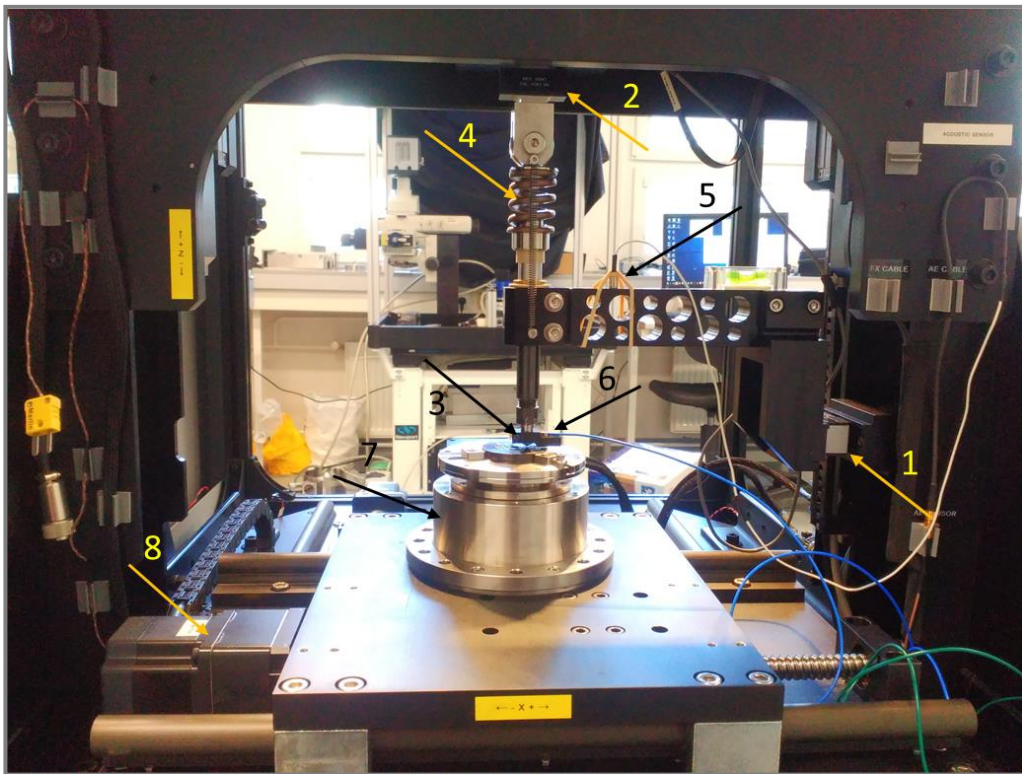


Obr. 23 Tribometr Bruker



Obr. 24 Optický profilometr Bruker

Měření tvrdosti bylo rovněž provedeno na konvenčním tvrdoměru firmy Struers. Pro tribometr Rtec byla použita následující konfigurace (obr.25):



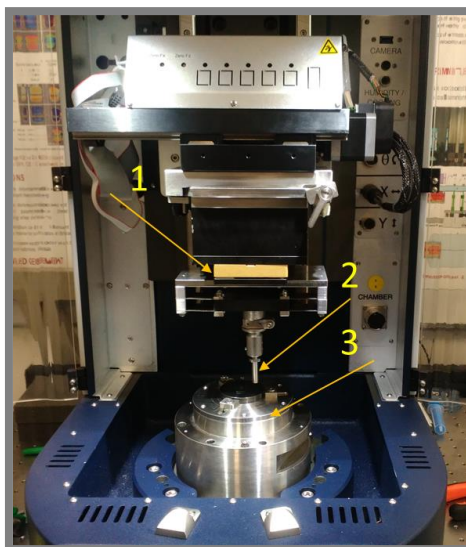
Obr. 25 Konfigurace tribometr Rtec

- 1 - Snímač tečné síly (rozsah 0 – 1000 N)
- 2 - Snímač normálové síly (rozsah 0 – 1000 N)
- 3 - Indentor
- 4 - Pružina vysoké tuhosti
- 5 - Snímač akustické emise
- 6 - Kapacitní snímač
- 7 - Pevný modul
- 8 - Pojezd ve směru X

Během testu zaznamenávají tyto veličiny:

- Normálová síla F_z [N]
- Tečná síla F_x [N]
- Akustické emise Ae [V]
- Poloha Z z [mm]
- Poloha X x [mm]
- Čas T [s]

Pro tribometr Bruker byla použita následující konfigurace (obr. 26):



Obr. 26 Konfigurace tribometru Bruker

- 1 - Snímač normálové síly (rozsah 0 – 1000 N)
- 2 - Indentor
- 3 - Pevný modul

Během testu zaznamenávají tyto data:

- Normálová síla F_z [N]
- Poloha Z z [mm]
- Čas T [s]

Jelikož na tribometru Bruker byla realizována pouze zkouška tvrdosti dle Vickerse, význam těchto dat sloužil pouze pro kontrolu průběhu testu.

4.1.2 Metody testování vrypové odolnosti

4.1.2

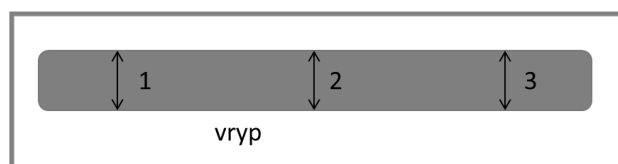
Na univerzálním tribometru RTEC byly vytvořeny dvě různé metodiky pro provedení vrypové zkoušky. První metodika byla sestavena podle normy ASTM G171–03. Touto metodou se stanovila vrypová odolnost materiálu. Druhá metodika byla sestavena dle normy ISO 20502 pro scratch test s progresivním zatížením. Výsledkem této metody bylo určení kritické síly, při níž došlo k porušení povlaku.

Scratch test s konstantním zatížením

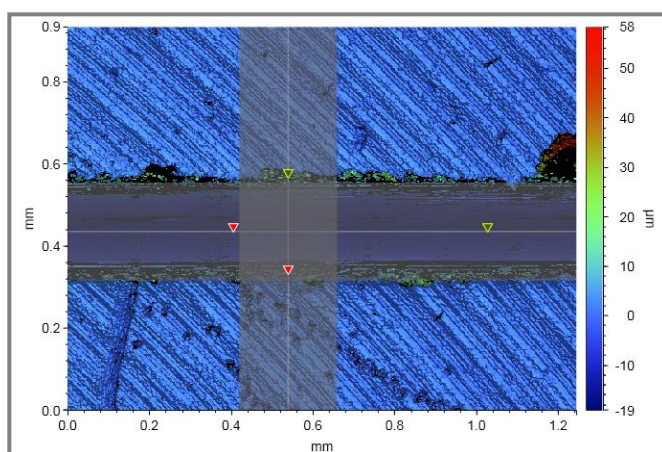
Metoda tkví ve vytvoření vrypu pomocí konstantního zatížení. Pro tuto metodu byla zvolena konfigurace zařízení dle obr. 25. Indentorem byl Rockwell C. Dále nebyl použit snímač akustické emise a kapacitní snímač. Zaznamenávání dat sloužilo pouze ke kontrole průběhu testu. Délka vrypu byla minimálně 5 mm, zatížení bylo konstantní, rychlost posuvu byla 15 mm/min. Před samotným měřením byl vzorek a indentor očištěn a poté byl vzorek pevně upnut.

Vyhodnocení bylo provedeno pomocí optického profilometru změřením šířky vrypu. Šířka vrypu byla změřena na třech různých místech, které byly dostatečně

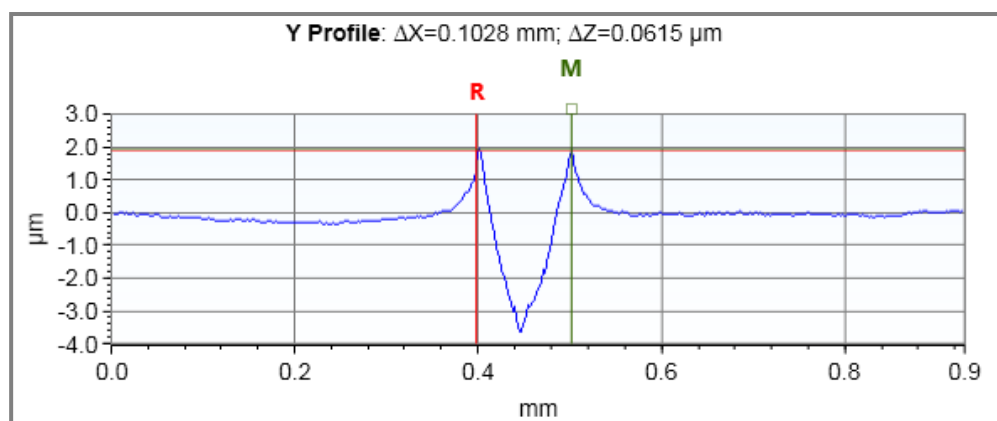
vzdáleny od sebe a taktéž od okraje vrypu (obr. 27). Šířka byla změřena mezi nejvyššími body profilu (obr. 28; 29). Z naměřených šířek byla stanovena jejich střední hodnota. Dle vztahu který uvádí norma ASTM G171 – 03, se určila vrypová odolnost.



Obr. 27 Místa měření šířky vrypu



Obr. 28 Měření šířky vrypu



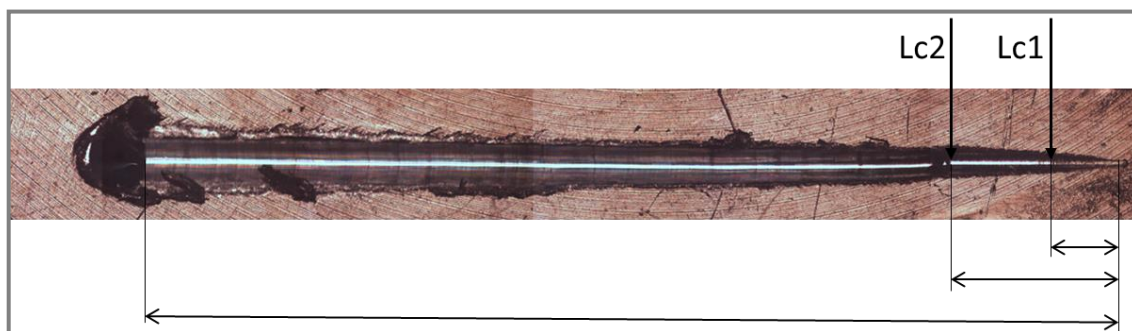
Obr. 29 Měření šířky vrypu

Scratch test s progresivním zatížením

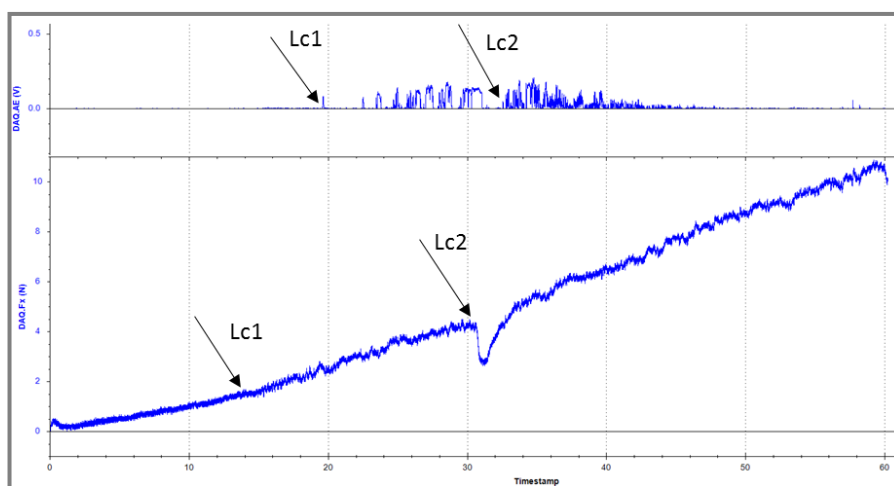
Podstatou metody je vytvoření vrypu pomocí lineárně vzrůstajícího zatížení. Pro tuto metodu byla zvolena konfigurace zařízení dle obr. 25, avšak nebyl použit kapacitní snímač. Indentorem byl Rockwell C. Délka vrypu byla 10 mm, zatížení mělo lineárně rostoucí charakter, rychlost posuvu byla 10 mm/min. Před samotným měřením byl vzorek a indentor očištěn a poté byl vzorek pevně upnut.

Vyhodnocení proběhlo pomocí optického mikroskopu, snímače akustické emise a teční síly. Pro optické vyhodnocení byly nejdříve zhotoveny jednotlivé snímky vrypu, ze kterých se sestavil obrázek kompletního vrypu. Určilo se místo

selhání povlaku a změřila se vzdálenost tohoto místa od počátku vrypu (obr. 30). Ze změřené vzdálenosti a nastavené rychlosti růstu zatížení se dle vztahu, který uvádí norma ISO 20502 určilo kritické zatížení L_c . Vyhonocení pomocí akustické emise Ae a tečné síly F_x , bylo provedeno přímo z dat záznamu scratch testu (obr. 31). V horní polovině obrázku je průběh akustické emise a v dolní polovině je průběh tečné síly. Čas poruchy byl stanoven ze změny průběhu naměřených dat. Přepočtem z rychlosti zatížení a času poruchy bylo stanoveno kritické zatížení L_c .



Obr. 30 Určení kritického zatížení ze snímku vrypu



Obr. 31 Určení kritického zatížení pomocí F_x a A_e

4.1.3 Metody testování tvrdosti materiálu

Metodika měření tvrdosti dle Vickerse byla sestavena pro oba tribometry. Metodika dle Rockwella byla sestavena pouze pro tribometr Rtec, jelikož tribometr Bruker není vybaven kapacitním snímačem, tudíž by nebylo možné provést vyhodnocení.

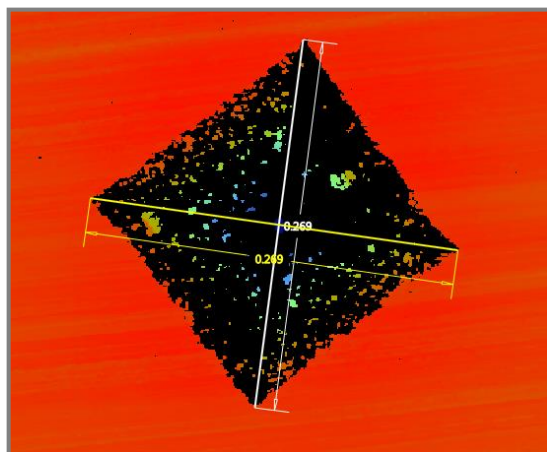
Metodika měření tvrdosti dle Vickerse

Pro metodu byla zvolena konfigurace tribometru Rtec dle obr. 25. Použit byl pouze snímač normálové síly pro kontrolu průběhu testu. Pro tribometr Bruker byla zvolena konfigurace dle obr. 26.

U tribometru Rtec byl růst zatížení lineární po dobu 6 s, následovala výdrž zatížení, která činila 12 s, a poté byl indentor odtížen v průběhu 3 s. Jelikož u tribometru Bruker nebylo možné aplikovat požadované zatížení během intervalu 6 s,

musel být tento časový interval navýšen na 20 s. Ostatní parametry testu zůstaly stejné jako v předchozím případě.

Vyhodnocení bylo provedeno pomocí optického profilometru změřením úhlopříček vtisku (obr. 32). Určila se střední hodnota a dle vztahu, který uvádí norma ČSN EN ISO 6507 se určila tvrdost dle Vickerse.



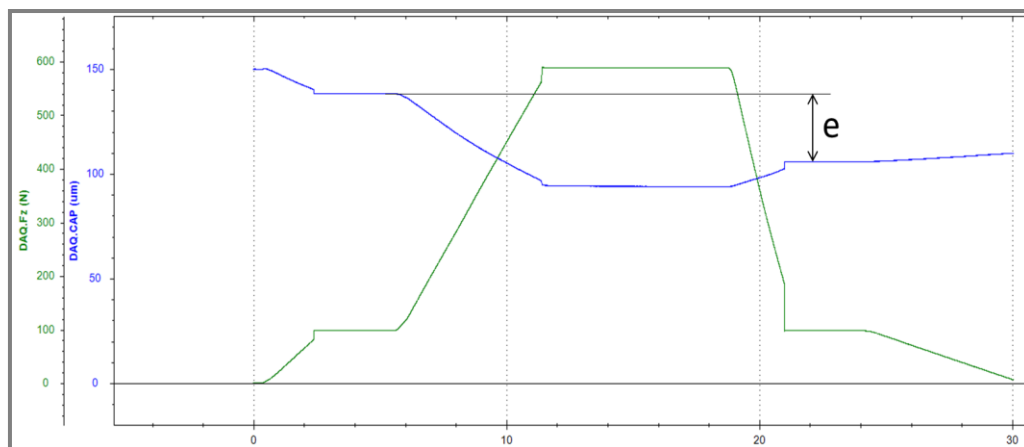
Obr. 32 Měření úhlopříček vtisku

Metodika měření tvrdosti dle Rockwella

Pro metodu byla zvolena konfigurace tribometru Rtec dle obr. 25. Avšak nebyl použit snímač akustické emise. Rovněž nebyl použit záznam dat ze snímače tečné síly.

Všechny aplikace zatížení a odtížení byly lineární, a doba jejich trvání byla 6 s. Hodnota předběžného zatížení byla 98,07 N a hodnota hlavního zatížení byla 588 N. V průběhu testu byla zaznamenávána data z kapacitního snímače a snímače normálové síly. Před samotným měřením byl vzorek a indentor očištěn a poté byl vzorek pevně upnut.

Vyhodnocení bylo provedeno z dat kapacitního snímače. Rozdílem hloubek vtisku při aplikaci základního zatížení, byla stanovena trvalá hloubka vtisku e . Hodnota tvrdosti se stanovila ze vztahu, který uvádí norma ČSN EN ISO 6508



Obr. 33 Stanovení trvalé hloubky vtisku e

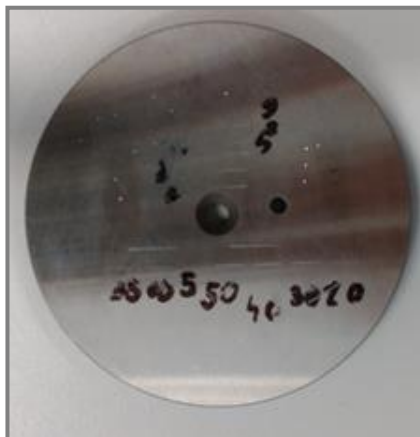
4.2 Materiály

Scratch testy a měření tvrdosti bylo aplikované na dvou vzorcích jimiž byly:

- Hliníková slitina s povlakem DLC (diamond-like carbon) tloušťky 5 μm (obr. 34).
- Středně legovaná ocel 1.2067 (100Cr 6), která má vysokou ořezvzdornost a je vhodná pro výrobu kuliček, válečků, kuželíků a kroužků valivých ložisek. (obr. 35). [14]



Obr. 34 Al + DLC



Obr. 35 Ocel

5 VÝSLEDKY

5.1 Metodika měření

Byly vytvořeny skripty pro universální tribometr RTEC, pomocí nichž lze reprodukovat následující metody měření:

- Zkouška tvrdosti dle Vickerse (příloha 1)
- Zkouška tvrdosti dle Rockwella (příloha 2)
- Scratch test s konstantním zatížením (příloha 3)
- Scratch test s progresivním zatížením (příloha 4)

Pro universální tribometr UMT Tribolab Bruker byl vytvořen následující skript

- Zkouška tvrdosti dle Vickerse (příloha 5)

5.2 Výsledky měření

Pomocí univerzálního tribometru Rtec byla vytvořena série scratch testů s konstantním a progresivním zatížením. Dále byla vytvořena série testů měření tvrdosti dle metody Vickers a Rockwell pomocí tribometrů Rtec a Bruker a konvenčního tvrdoměru (obr. 36).



Obr. 36 Tvrdoměr Struers

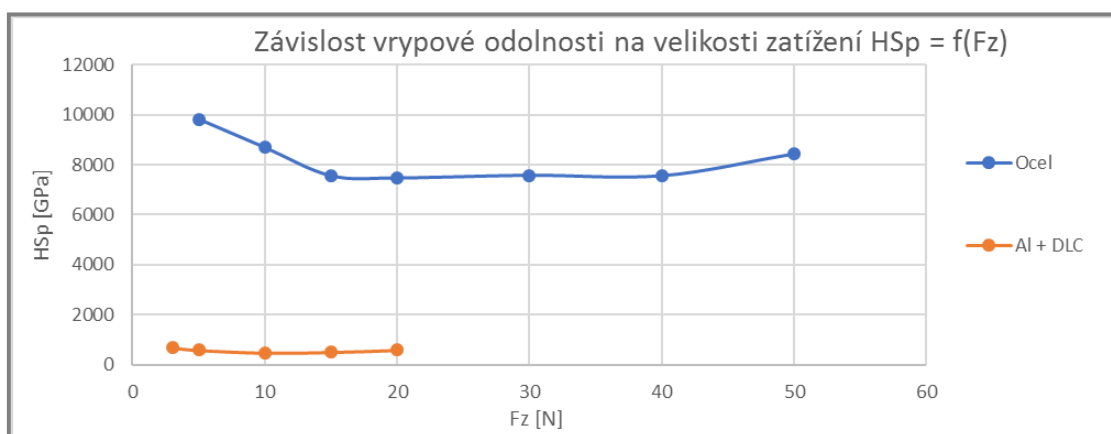
5.2.1 Scratch test s konstantním zatížením

Byly provedeny scratch testy s rozdílnými hodnotami konstantního zatížení pro vzorky ocel a Al + DLC. Vrypky měly vždy délku 5 mm a rychlost posuvu byla 10 mm/min. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí optického profilometru Bruker. Metodika měření, včetně způsobu vyhodnocení je uvedena v příloze 3. Vrypová odolnost byla určena dle vztahu, který uvádí norma ASTM G171-03.

Přehled provedených scratch testů a vyhodnocené vrypové odolnosti je uveden v tab. 2. Z výsledků jednotlivých měření byl sestrojen graf (obr. 37), který by teoreticky měl demonstrovat nezávislost naměřené vrypové odolnosti při různých hodnotách zatížení.

Tab. 2 Aplikovaná zatížení pro daný vzorek

Al + DLC							
F _z [N]	3	5	10	15	20		
HS _p [GPa]	677,9	584,6	483,1	509,8	588,2		
Ocel							
F _z [N]	5	10	15	20	30	40	50
HS _p [GPa]	9824,3	8684,4	7545,3	7455,6	7559,8	7543,7	8429,5



Obr. 37 Závislost vrypové odolnosti na velikosti zatížení

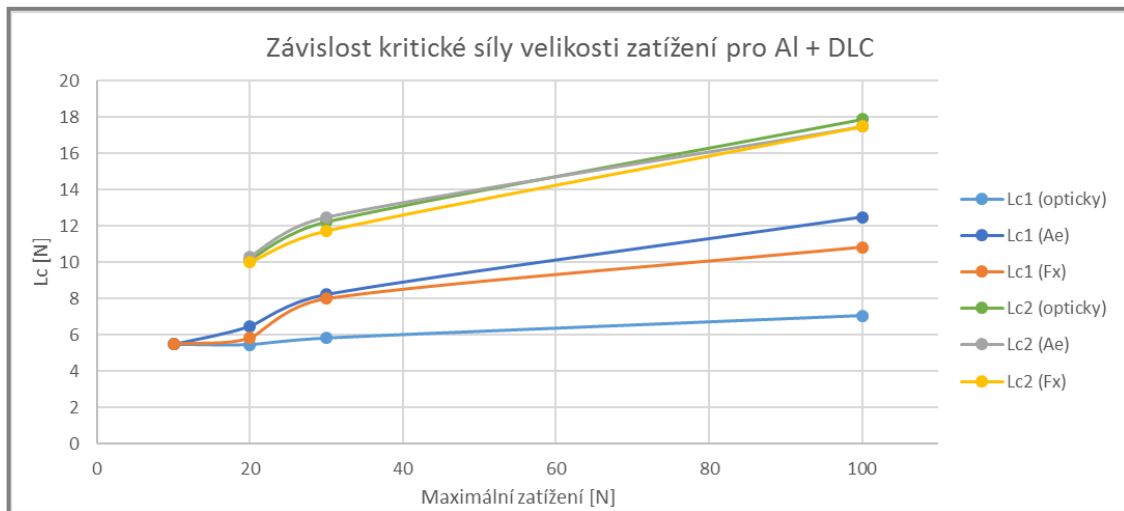
5.2.2 Scratch test s progresivním zatížením

Byly provedeny progresivní scratch testy na vzorku Al + DLC s rychlostmi růstu zatížení 10, 20, 30 a 100 N/min. Vrypny měly délku 10 mm a rychlost posuvu byla 10 mm/min. Počáteční zatížení bylo 1 N a růst zatížení byl lineární. Vyhodnocení proběhlo pomocí optického mikroskopu, snímače akustické emise a tečné síly. Metodika měření, včetně způsobu vyhodnocení je uvedena v příloze 4.

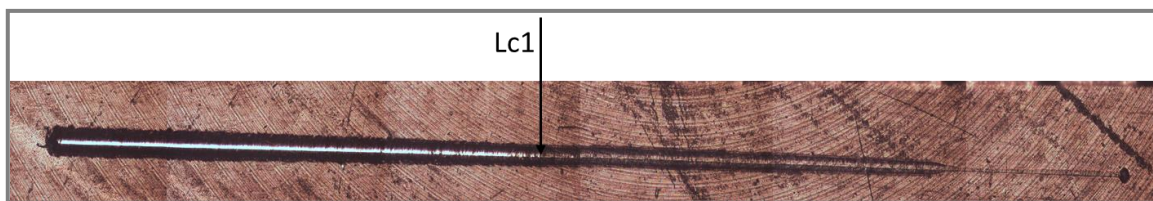
Přehled provedených testů včetně vyhodnocení kritického zatížení je uvedeno v tab. 3. U měření, kde síla na konci testu byla větší než 10 N, byly zjištěny dvě různé formy kritického zatížení, tudíž je uvedena L_{c1} i L_{c2}. Z výsledků testů byl vytvořen graf (obr. 38), který znázorňuje velikost kritického zatížení v závislosti na rychlosti růstu zatížení a způsobu vyhodnocení. Snímky jednotlivých vrypů, včetně určení místa kritické síly jsou na obr. 39; 40; 41; 42.

Tab. 3 Kritické zatížení v závislosti na způsobu vyhodnocení

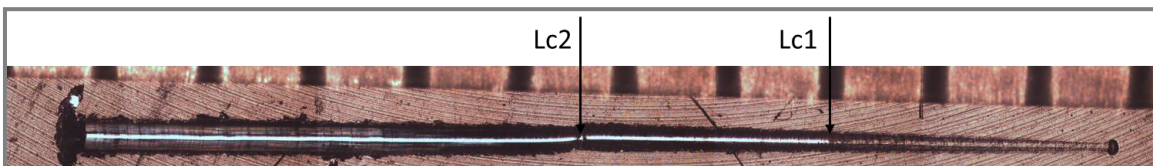
Zatížení s [N/min]	10	20	30	100
L _{c1} [N] - opticky	5,48	5,46	5,82	7,05
L _{c1} [N] - Ae	5,67	6,50	8,25	12,50
L _{c1} [N] - Fx	5,33	5,83	8,00	10,83
L _{c2} [N] - opticky	-	10,16	12,24	17,91
L _{c2} [N] - Ae	-	10,83	13,50	18,33
L _{c2} [N] - Fx	-	10,00	11,75	17,50



Obr. 38 Vyhodnocení Lc



Obr. 39 Scratch test 0 – 10 N



Obr. 40 Scratch test 0 – 20 N



Obr. 41 Scratch test 0 – 30 N



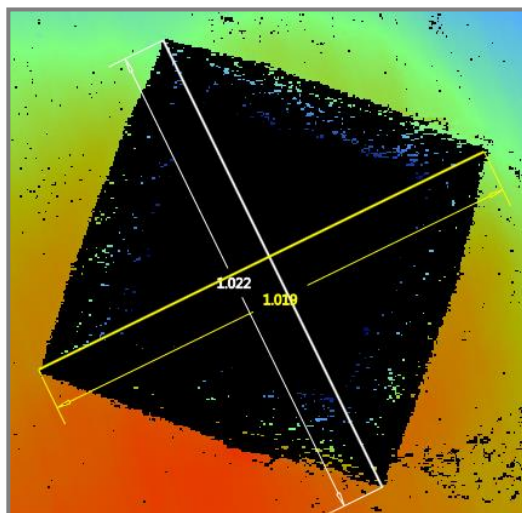
Obr. 42 Scratch test 0 – 100 N

5.2.3 Měření tvrdosti

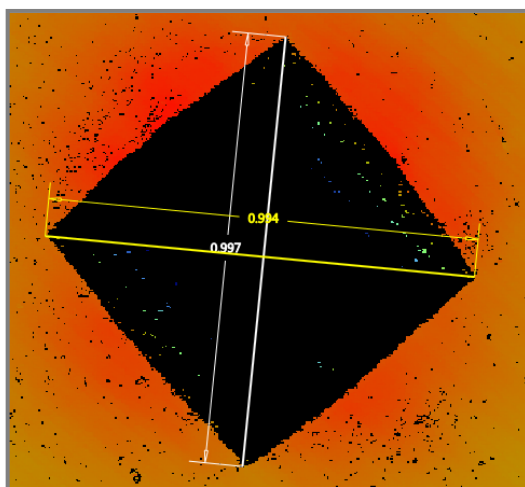
Pro měření tvrdosti byla použita metoda Vickers a Rockwell. Zkouška dle Vickerse byla provedena pomocí tribometrů Rtec a Bruker, a konvenčního tvrdoměru. Jelikož tribometr Bruker není vybaven kapacitním snímačem, byla zkouška dle Rockwella provedena pouze na tribometru Rtec a konvenčního tvrdoměru. Konkrétními metodami byly HV30 a HRA. Metodiky těchto zkoušek, včetně vyhodnocení, jsou součástí této práce jakožto samostatné přílohy (příloha 1; 2; 5). Měření proběhlo pro vzorky ocel a Al + DLC, kdy byl každý test opakován 5x. Přehled středních hodnot a směrodatných odchylek tvrdosti je uveden v tab. 4.

Tab. 4 Hodnoty tvrdosti

Měřicí zařízení	Rtec	Bruker	Konvenční tvrdoměr
HV30 (ocel)	$760 \pm 11,1$	$738 \pm 12,5$	$726 \pm 7,6$
HRA (ocel)	$84 \pm 0,2$	-	$83 \pm 0,1$
HV30 (Al + DLC)	$56 \pm 0,3$	$53 \pm 0,1$	$54 \pm 0,6$



Obr. 43 Vickers, DLC, Bruker



Obr. 44 Vickers, DLC, Rtec

6 DISKUZE

6.1 Kritické zhodnocení možností použití univerzálních tribometrů

Zkoušky tvrdosti a vrypové odolnosti lze realizovat pomocí univerzálních tribometrů. Největší výhodou univerzálních tribometrů oproti jednoúčelovým zařízením je možnost volby parametrů testů i konfigurace zařízení, čímž si můžeme vytvořit jakýkoliv metodický postup. Tudíž na jednom zařízení jsme schopni vykonat veškeré zkoušky tvrdosti i vrypové odolnosti.

Oproti tomu mají tribometry značné nevýhody. Hlavní nevýhodou je, že tribometry nemají implementovány nástroje pro vyhodnocení testů. Tudíž oproti jednoúčelovým zařízením, kde se vyhodnocení provede automaticky, je nutné provést vyhodnocení osobně. Vyhodnocení průběhu polohy či sil během testu provedeme přímo v softwaru tribometru. Pro určení vzdáleností nebo šířek je nutné použít mikroskop, což dělá samotné vyhodnocení časově náročnější. Rovněž manipulace s tribometry je komplikovanější a vyžaduje vyšší seznámení se se softwarem.

Konstrukční provedení zatěžovacího mechanismu je v případě tribometrů složeno z více prvků. Toto platí hlavně u tribometru Rtec, kde se normálová síla aplikuje přes pružinu a rameno umožňující rotaci kolem osy Y. Tímto je do měření vnesena nepřesnost, která je patrná z naměřených dat tvrdosti. Nicméně opakovatelnost měření v porovnání s konvenčními tvrdoměry je podobná.

6.2 Porovnání výsledků

Naměřené výsledky nelze považovat z hlediska norem za korektní, jelikož nebyl realizován dostatečný počet testů. Dále nebyly dodrženy minimální vzdálenosti mezi vpichy a vrypy. Důvodem byl nedostatečný rozměr vzorku. Výsledky mají povahu pouze porovnání a zhodnocení využití univerzálních tribometrů, nikoli stanovení materiálových charakteristik.

Scratch test s konstantním zatížením

U této metody je důležité si stanovit způsob měření šířky vrypu. V případě oceli byla naměřena vrypová odolnost nezávislá na zatížení v intervalu 15 – 40 N. Při zatížení mimo tento rozsah se výsledky už více lišily. Tudíž, pokud nejsou přímo stanovené parametry zkoušky, je vhodné uvážit volbu zatížení, nebo vytvořit sérii vrypů s rozdílnými zatíženími. Vzorek Al + DLC vykazoval obdobný průběh.

Scratch test s progresivním zatížením

Jako nejlepší metoda vyhodnocení těchto vrypů je určení kritického zatížení pomocí optiky, což je i zmíněno v příslušné normě. Vyhodnocení ze záznamu akustické emise a tečné síly je obtížné, nepřesné a vyžaduje značnou zkušenost. Nicméně probíhá přímo v softwaru tribometru. To neplatí u optického vyhodnocení. Nejdříve se musí vytvořit snímek vrypu a poté lze test vyhodnotit. To činí metodu časově velmi náročnou. Dále je nutné pro test dobře zvolit rychlost růstu zatížení. Při vyšších rychlostech narůstala i kritická síla, čímž vzniká nepřesnost měření.

Měření tvrdosti

Metodu HRA bylo možné aplikovat pouze pro ocel, protože u vzorku Al + DLC při snížení hlavního zatížení na základní indentor stále pronikal do vzorku, čímž vznikla nepravdivá hodnota tvrdosti. Příčinou je měkký materiál. Během lineárních změn zatížení docházelo ke skokovému přírůstku zatížení. Tento jev se nepodařilo eliminovat, avšak na výsledky to nemělo vliv, jelikož pro tribometr a jednoúčelový tvrdoměr jsou totožné.

Výsledky metody HV30 pro ocel se nepatrně liší, nicméně se nachází v přijatelných mezích. U vzorku Al + DLC se výsledky shodovali.

Porovnáním výsledků univerzálních tribometrů a jednoúčelových tvrdoměrů se potvrdila možnost využití univerzálních tribometrů při zkouškách tvrdosti.

7 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá metodikou měření tvrdosti a vrypové odolnosti pomocí universálních tribometrů. V první části práce je výčet jednotlivých metod testování materiálu, na které navazuje přehled současných norem popisující tyto metody. Hlavním cílem práce bylo vytvořit metodický postup měření tvrdosti a vrypové odolnosti pomocí univerzálního tribometru.

Výsledkem práce jsou vytvořené metodické postupy měření a vyhodnocení vybraných metod. Pro tyto účely byly použity 2 universální tribometry, optický profilometr a optický mikroskop. Vytvořené metodiky byly následně realizovány na dvou kovových materiálech, kdy každý byl charakteristický rozdílnými vlastnostmi. Na závěr byly zkoušky tvrdosti vykonány pomocí jednoúčelových tvrdoměrů. Tím se získala data, která sloužila ke kritickému posouzení využití universálních tribometrů při měření tvrdosti. Jednotlivé výsledky jsou zpracovány do tabulek a grafů.

Výsledky prokázaly, že pomocí universálních tribometrů jsme schopni vykonat zkoušky tvrdosti a vrypové odolnosti. Nicméně je nutno podotknout, že zkoušku dle Rockwella se nepodařilo aplikovat na měkkém materiálu, kterým byla hliníková slitina s povlakem DLC. U scratch testů s konstantním zatížením, nebyl problém s vyhodnocením vrypové odolnosti. U progresivních scratch testů se výsledky prvního kritického zatížení, které bylo vyhodnoceno pomocí různých metod lišily. Pro přesnější vyhodnocení by bylo nutné mít více zkušeností s těmito metodami.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VELES, Pavol. Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. 1. vyd. Bratislava: Praha: Alfa; SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985, 401 s.
- [2] JAREŠ, Vojtěch. Základní zkoušky kovů a jejich teorie. 1.vyd. Praha: Academia, 1966, 210 s.
- [3] MOLÍKOVÁ, Eva. Zkoušení materiálů a výrobků. [online]. 2006. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>
- [4] ČSN EN ISO 6506-1. Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část 1: Zkušební metoda. Český normalizační institut, 2006.
- [5] ČSN EN ISO 6507-1. Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda. Český normalizační institut, 2006.
- [6] ČSN EN ISO 6508-1. Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Část 1: Zkušební metoda. Český normalizační institut, 2006.
- [7] ISO 20502. Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics): Determination of adhesion of ceramic coatings by scratch testing. Geneva: International Organization of Standardization, 2005.
- [8] ASTM G171-03(2009)e2. Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
- [9] BULL, S., J., BERASETEGUI, E., G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing, Tribology International [online], vol. 39, issue 2, 2006, p. 99-114, ISSN 0301-679X [cit. 1.4.2017]. Dostupné z: <http://booksc.org/book/3949261/ba3ea0>
- [10] DUANJIE Li, PhD. Understanding coating failures using scratch testing [online], Irvine, 2013 [cit. 1.4.2017]. Dostupné z: <http://nanovea.com/App-Notes/coating-failure-scratch.pdf>
- [11] MĚŘENÍ TVRDOSTI. [online]. 2011. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.merenitvrlosti.cz/>
- [12] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. Základní zkoušky kovových materiálů. Plzeň: Západočeská Univerzita, 2005. 175 s. ISBN 80-7043-417-1.
- [13] HITECHTRADER. [online]. 2017. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.hitechtrader.com>
- [14] TUMLIKOVO. [online]. 2017. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.tumlikovo.com>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>HV</i>		tvrdost podle Vickerse
<i>HB</i>		tvrdost podle Brinella
<i>HR</i>		tvrdost podle Rockwella
<i>PFST</i>		progresivní sratch test
<i>CFST</i>		konstantní sratch test
<i>MFST</i>		opakovaný sratch test
<i>F</i>	[N]	zkušebního zatížení
<i>u</i>	[mm]	aritmetický průměr úhlopříček
<i>Z</i>	[mm]	vzdálenost skutečné a geometricky přesné hrany vtisku
<i>F₀</i>	[N]	předběžné zatížení
<i>F₁</i>	[N]	plné zatížení
<i>e</i>	[mm]	trvalá hloubka vtisku
<i>D</i>	[mm]	průměr kuličky
<i>d</i>	[mm]	střední hodnota průměru vtisku
<i>R_m</i>	[MPa]	mez pevnosti
<i>c</i>	[-]	konstanta zahrnující druh zkoušeného materiálu
<i>L_C</i>	[N]	kritická síla
<i>t</i>	[s]	čas
<i>l</i>	[mm]	vzdálenost místa selhání od počátku vrypu
<i>s</i>	[N/min]	rychlost růstu zatížení
<i>p</i>	[mm/min]	rychlost posuvu
<i>HS_p</i>	[Pa]	hodnota vrypové odolnosti
<i>F_z</i>	[N]	normálová síla
<i>w</i>	[mm]	šířka vrypu
<i>m</i>	[kg]	hmotnost zatížení
<i>x</i>	[μm]	šířka vrypu
<i>D_{sc}</i>	[-]	koeficientu odporu hrotu
<i>F_{scr}</i>	[N]	průměrná hodnota třecí síly podél celého vrypu
<i>F_x</i>	[N]	tečná síla
<i>Ae</i>	[V]	akustické emise
<i>z</i>	[mm]	poloha Z
<i>x</i>	[mm]	poloha X

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3	Tvrdoměr [11]	12
Obr. 4	Průběh zatížení, metoda Vickers [5]	14
Obr. 3	Ilustrace vtisku, metoda Vickers [5]	15
Obr. 4	Minimální vzdálenost mezi vtisky [5]	16
Obr. 5	Průběh zkoušky Rockwell [6]	17
Obr. 6	Časový průběh zkoušky Rockwell [6]	18
Obr. 7	Minimální vzdálenost mezi sousedními vtisky [6]	18
Obr. 8	Princip zkoušky dle Brinella [4]	19
Obr. 9	Časový průběh zkoušky Brinell [4]	20
Obr. 10	Závislost tvrdosti na zatížení [12]	21
Obr. 11	Průměr vtisku dle zpevnění materiálu [12]	21
Obr. 12	Minimální vzdálenost mezi sousedními vtisky [4]	22
Obr. 13	Převod hodnot Brinell na Vickers [12]	23
Obr. 14	Vrpy zhotovené pomocí scratch testeru [10]	23
Obr. 15	Scratch tester [13]	24
Obr. 16	Určení kritické síly [7]	25
Obr. 17	Schéma scratch testeru [7]	26
Obr. 18	Závislost zatížení a posuvu na čase, PFST [7]	27
Obr. 19	Závislost zatížení a posuvu na čase, CFST [7]	28
Obr. 20	Určení L_c pomocí třecí síly nebo akustické emise [7]	29
Obr. 21	Místa měření šířky vrypu [8]	31
Obr. 22	Tribometr Rtec	33
Obr. 23	Tribometr Bruker	33
Obr. 24	Optický profilometr Bruker	33
Obr. 25	Konfigurace tribometr Rtec	34
Obr. 26	Konfigurace tribometru Bruker	35
Obr. 27	Místa měření šířky vrypu	36
Obr. 28	Měření šířky vrypu	36
Obr. 29	Měření šířky vrypu	36
Obr. 30	Určení kritického zatížení ze snímku vrypu	37
Obr. 31	Určení kritického zatížení pomocí F_x a A_e	37
Obr. 32	Měření úhlopříček vtisku	38
Obr. 33	Stanovení trvalé hloubky vtisku e	38
Obr. 34	Al + DLC	39
Obr. 35	Ocel	39
Obr. 36	Tvrdoměr Struers	40
Obr. 37	Závislost vrypové odolnosti na velikosti zatížení	41
Obr. 38	Vyhodnocení L_c	42
Obr. 39	Scratch test 0 – 10 N	42
Obr. 40	Scratch test 0 – 20 N	42
Obr. 41	Scratch test 0 – 30 N	42
Obr. 42	Scratch test 0 – 100 N	42
Obr. 43	Vickers, DLC, Bruker	43
Obr. 44	Vickers, DLC, Rtec	43

SEZNAM TABULEK

Tab. 2	Volba konstanty k dle testovaného materiálu [1]	21
Tab. 2	Aplikovaná zatížení pro daný vzorek	41
Tab. 3	Kritické zatížení v závislosti na způsobu vyhodnocení	41
Tab. 4	Hodnoty tvrdosti	43

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Zkouška tvrdosti dle Vickerse - Rtec
- Příloha 2** Zkouška tvrdosti dle Rockwella - Rtec
- Příloha 3** Scratch test s konstantním zatížením - Rtec
- Příloha 4** Scratch test s progresivním zatížením - Rtec
- Příloha 5** Zkouška tvrdosti dle Vickerse - Bruker